

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет
имени первого Президента России Б. Н. Ельцина»

А.С. Антонова, К.А. Аксенов

**РАЗРАБОТКА МЕТОДА ПЛАНИРОВАНИЯ
БИЗНЕС-ПРОЦЕССОВ НА ОСНОВЕ
ИМИТАЦИОННО-ЭВОЛЮЦИОННОГО
МОДЕЛИРОВАНИЯ**

Монография

Москва
2020

УДК 004.94
ББК 32.81
А42

Рецензенты:

Круглов А.В. – канд. техн. наук, доцент лаборатории Промышленной разработки ПО (Университет Иннополис, г. Иннополис);

Лаппо С.С. – канд. техн. наук, доцент, генеральный директор АО «Ведение реестров компаний».

Антонова, А.С., Аксенов, К.А.

А42 Разработка метода планирования бизнес-процессов на основе имитационно-эволюционного моделирования: монография / А.С. Антонова, К.А. Аксенов. – М.: Издательский дом Академии Естествознания, 2020. – 160 с.

ISBN 978-5-91327-641-4

Книга содержит описание разработки гибридного метода планирования бизнес-процессов и проектных работ. Предложенные метод и информационная технология интегрируют в себе популярные инструменты поддержки принятия решений в организационных системах: имитационное и эволюционное моделирование. Разработанные модели процессов и предложенный метод планирования могут быть использованы в области производства, логистических, организационных и бизнес-процессов. Данная книга рекомендуется студентам и аспирантам технических вузов, аналитикам, руководителям проектных организаций для ознакомления с теоретическими и практическими аспектами реализации интеллектуальных систем поддержки принятия решений в сфере планирования бизнес-процессов.

Библиогр.: 158 назв. Табл. 25. Рис. 52.

**УДК 004.94
ББК 32.81**

ISBN 978-5-91327-641-4

© Антонова А.С., Аксенов К.А., 2020

© ИД «Академия Естествознания»

© АНО «Академия Естествознания»

ОГЛАВЛЕНИЕ

| | |
|---|-----|
| ВВЕДЕНИЕ | 5 |
| 1. ПЛАНИРОВАНИЕ БИЗНЕС-ПРОЦЕССОВ КАК ОБЪЕКТ УПРАВЛЕНИЯ И МОДЕЛИРОВАНИЯ..... | 8 |
| 1.1. Задача планирования бизнес-процессов и проектных работ | 8 |
| 1.2. Обзор методов планирования | 11 |
| 1.2.1. Методы теории расписаний..... | 11 |
| 1.2.2. Сетевые методы планирования | 27 |
| 1.2.3. Имитационные и мультиагентные методы планирования | 30 |
| 1.2.4. Эволюционные методы планирования..... | 36 |
| 1.3. Сравнительный анализ систем динамического моделирования ситуаций | 38 |
| 1.4. Анализ применимости методов теории планирования экспериментов..... | 41 |
| 1.5. Выводы..... | 45 |
| 2. МЕТОД МУЛЬТИАГЕНТНОЙ ГЕНЕТИЧЕСКОЙ ОПТИМИЗАЦИИ (МГО) ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ ПЛАНИРОВАНИЯ | 47 |
| 2.1. Постановка задачи календарного планирования проектных работ | 47 |
| 2.2. Разработка эвристико-имитационного метода планирования работ | 50 |
| 2.3. Разработка нового метода МГО | 61 |
| 2.4. Сравнительный анализ метода МГО и методов планирования | 67 |
| 2.5. Выводы..... | 73 |
| 3. ПРОГРАММНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ МЕТОДА МГО..... | 74 |
| 3.1. Реализация метода МГО в системе BPsim | 74 |
| 3.1.1. Постановка задачи на разработку интеллектуального агента (визарда) | 74 |
| 3.1.2. Построение DFD-диаграмм программного комплекса визарда..... | 78 |
| 3.1.3. Проектирование диаграммы классов и реализация визарда | 82 |
| 3.2. Реализация метода МГО в системе выпуска металлургической продукции..... | 89 |
| 3.2.1. Постановка задачи на разработку технологии эволюционного моделирования | 89 |
| 3.2.2. Реализация информационной технологии в модуле оптимизации процессов..... | 92 |
| 3.2.3. Тестирование работы технологии имитационно- эволюционного моделирования | 97 |
| 3.3. Выводы..... | 102 |

| | |
|--|-----|
| 4. ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА МУЛЬТИАГЕНТНОЙ ГЕНЕТИЧЕСКОЙ ОПТИМИЗАЦИИ | 104 |
| 4.1. Применение метода МГО к задаче планирования ЗАО «Телесистемы» | 104 |
| 4.1.1. Разработка мультиагентной имитационной модели исполнения работ | 104 |
| 4.1.2. Обоснование адекватности мультиагентной имитационной модели | 110 |
| 4.1.3. Применение эвристико-имитационного метода к задаче планирования | 116 |
| 4.1.4. Применение метода МГО к задаче планирования | 120 |
| 4.1.5. Сравнительный анализ использования методов планирования | 127 |
| 4.2. Применение метода МГО к задачам планирования бизнес-процессов производства | 131 |
| 4.3. Выводы | 140 |
| ЗАКЛЮЧЕНИЕ | 141 |
| СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ | 143 |
| СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ | 145 |

ВВЕДЕНИЕ

Книга посвящена вопросам поддержки принятия решений при планировании бизнес-процессов (БП). Задача календарного планирования БП является одной из ключевых задач управления организационными системами. К рассматриваемым БП относятся процессы выполнения проектных работ, в том числе с привлечением сторонних (субподрядных) ресурсов.

В данной книге рассматривается задача календарного планирования, связанная с формированием такого плана работ, который обеспечивал бы выполнение всех работ в директивные сроки с учетом возможности сдвига начала выполнения работ в заданных временных рамках. Для выполнения работ используются ограниченные складываемые и нескладываемые ресурсы. К нескладываемым ресурсам относятся ресурсы, которые допускают повторное использование после высвобождения, например, персонал. К складываемым относятся ресурсы, которые полностью расходуются в заданном объеме в процессе выполнения, например, технические объекты в процессе монтажа.

К одной из основных проблем, с которыми сталкивается при планировании лицо, принимающее решения (ЛПР), можно отнести возникновение противоречий между директивными сроками и ограничениями на нескладываемые ресурсы. Возможным решением является привлечение субподрядных ресурсов в случае недоступности собственных ресурсов. С учетом вышесказанного, целью планирования помимо соблюдения директивных сроков является снижение затрат на привлечение субподрядных (нескладываемых) ресурсов. Предпри-

ятия различных сфер деятельности сталкиваются с подобными задачами, например, производственные и проектные организации, имеющие фиксированный штат сотрудников и своевременно и гибко реагирующие на изменение спроса путем привлечения субподрядных ресурсов в случае необходимости. Время принятия решения при планировании не должно превышать критического значения для обеспечения своевременного реагирования на изменение спроса. Неэффективное планирование в подобных организациях приводит к финансовым потерям.

Таким образом, актуальной задачей является разработка метода и информационной технологии (ИТ) планирования с учетом оптимизации стоимости субподряда, наличия временных ограничений и ограничений на ресурсы складированного и нескладированного типа.

Задача календарного планирования относится к классу задач, изучаемых в рамках теории расписаний и сетевого планирования. Развитием данных направлений науки занимались отечественные и зарубежные ученые: Гимади Э. Х., Гончаров Е. Н., Канев В. С., Кочетов Ю. А., Мезенцев Ю. А., Моудер Дж., Норенков И. П., Прилуцкий М. Х., Севастьянов С. В., Столяр А. А., Танаев В. С., Шкурба В. В., Johnson S., Hap W., Kelley E., Pinedo M., Pritsker A. и др.

Рассматриваемая оптимизационная задача при наличии ограничений на ресурсы и директивные сроки выполнения работ в общем случае является алгоритмически сложной. Для решения подобных задач применяют либо малотрудоемкие приближенные алгоритмы, либо эвристики, сужающие пространство поиска. Применение к задаче планирования эвристических методов эволюционного моделирования рассмотрено в работах Аверченко В. И., Емельянова В. В., Курейчика В. В., Мышенкова К. С., Полетайкина А. Н., Шаповалова Т. С., Brezuliani A., Karova M., Klimek M., Okada I., Osaba E., Sriprasert E. и др. При этом в научных публикациях по теме исследования задаче оптимизации стоимости привлекаемого субподряда и учету дискретных ограниченных складированных ресурсов не уделено должного внимания.

Таким образом, разработка метода и компьютерной технологии планирования с учетом складированных и нескладированных ресурсов и снижения затрат на субподрядные ресурсы на основе гибридного эвристического метода имитационно-эволюционного моделирования представляет научный и практический интерес.

Идея книги заключается в применении генетической оптимизации к предметной области процессов преобразования ресурсов.

Структура материала книги выглядит следующим образом.

Книга состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы.

В первой главе книги обоснована необходимость автоматизации процесса планирования работ в условиях ресурсных и временных ограничений, приведен обзор методов календарного планирования, выполнен сравнительный анализ систем динамического моделирования ситуаций (СДМС), определены требования к методу и ИТ планирования БП и проектных работ.

Во второй главе излагается новый метод мультиагентной генетической оптимизации (МГО) для решения задачи планирования. Приведен сравнительный анализ предложенного метода и существующих методов планирования.

В третьей главе рассмотрены особенности программной реализации метода МГО в СДМС BPsim.MAS и автоматизированной системе выпуска металлургической продукции (АС ВМП).

В четвертой главе приведены примеры применения метода МГО к задачам планирования организационных БП. Примеры включают описание разработанных мультиагентных моделей организационных процессов.

Авторы выражают признательность В.С. Каневу, Ю.А. Мезенцеву, Б.И. Клебанову, С.В. Поршневу за ценные замечания при обсуждении рукописи. За предоставленную экспериментальную базу благодарим В.В. Кабирова (ЗАО «Телесистемы»).

1. ПЛАНИРОВАНИЕ БИЗНЕС-ПРОЦЕССОВ КАК ОБЪЕКТ УПРАВЛЕНИЯ И МОДЕЛИРОВАНИЯ

1.1. Задача планирования бизнес-процессов и проектных работ

Задача планирования бизнес-процессов и проектных работ является одной из задач управления организационными системами (ОС). С задачами управления ОС сталкивается любое предприятие, ставящее перед собой цель повышения конкурентоспособности и инвестиционной привлекательности в условиях рыночной экономики. К таким задачам можно отнести составление бизнес-плана модернизации предприятия, структурную реорганизацию предприятия, обеспечение жизненного цикла изделия, составление и выполнение проектов. Компьютерная поддержка процессов решения подобных задач обеспечивает выработку наиболее перспективных и рациональных решений в условиях быстро изменяющихся условий внешней среды.

Современная ОС является сложной системой управления, включающей многосортные множества взаимосвязанных и взаимодействующих в пространстве и во времени элементов, формирующих её интегративные свойства и функционирующих совместно для достижения целей, поставленных перед системой [1–4]. Примерами ОС могут служить высокотехнологичные предприятия различных отраслей, мульти-сервисные сети связи, проектные организации.

Анализ и синтез системы – это инструмент управления, направленный на более эффективную организацию системы с учетом всех ее ограничений и целей функционирования. Применительно к процессу принятия решений задача анализа заключается в выборе лучшего варианта из заданного набора альтернативных вариантов с использованием некоторого набора критериев качества решения. При этом право выбора и оценки вариантов полностью принадлежит ЛПР. Задача синтеза является частью процесса принятия решений в том случае, если альтернативные варианты представляют собой сложные многоэлементные структуры, при этом существует возможность объединения в единый вариант различных подмножеств элементов [5].

Задача планирования является одной из ключевых задач управления ОС и входит в качестве подзадачи в проблему управления проектами. Под управлением проектом будем понимать деятельность, направленную на реализацию проекта с максимально возможной эффективностью при заданных ограничениях по времени и ресурсам. Для того чтобы справиться с ограничениями предшествования работ используются методы построения и контроля сетевых графиков работ (метод критического пути [6]).

Задача календарного планирования работ относится к классу задач, изучаемых в рамках теории расписаний, появившейся в середине XX века [7, 8]. Развитием данного направления науки занимались отечественные и зарубежные ученые: Гимади Э. Х. [9–14], Гончаров Е. Н. [15, 16], Канев В. С. [17–19], Кочетов Ю. А. [25, 26], Мезенцев Ю. А. [20–22], Моудер Дж. [6], Норенков И. П. [28], Прилуцкий М. Х. [29], Севастьянов С. В. [23, 24], Столяр А. А. [25–27], Танаев В. С. [7, 8], Фламгольц Э. [6], Шкурба В. В. [7], Johnson S. [30], Happ W. [31], Pinedo M. L. [32, 33], Pritsker A. [31], и др. К настоящему времени сформировался ряд методов решения задачи календарного планирования в зависимости от постановки задачи, накладываемых ограничений и целевой функции: методы теории расписаний [7–27, 32, 33], сетевые методы [6, 28, 31–34], методы имитационного и мультиагентного моделирования [38–55], методы эволюционного моделирования, в частности, генетические алгоритмы [56–69].

В общем виде задача календарного планирования формулируется как задача определения такой последовательности работ, которая удовлетворяла бы заданным ограничениям и сводила к минимуму время выполнения всех работ. Календарным планом (расписанием) является совокупность календарных сроков начала выполнения всех работ. Обычно в качестве ресурсов работ рассматриваются нескладируемые ресурсы, например, персонал, агрегаты, транспортные средства. Тем не менее, для определенных задач планирования (например, планирование строительных операций [67]) необходимо рассматривать распределение по работам складируемых ресурсов (цемента, песка, кирпичей и т.д.). При этом существует понятие «время жизни» складируемого ресурса, определяющее временной промежуток, по истечении которого ресурс становится непригоден для использования в силу потери им определенных физических и химических свойств (например, затвердевший бетон).

Выделим особенности рассматриваемой задачи планирования работ по сравнению с другими задачами управления ОС.

1. Наличие ограничений задачи планирования.

В [64] выделено четыре типа ограничений, накладываемых на формируемый календарный план работ: ресурсное, предшествования, физического размещения, информационное. С учетом анализа деятельности проектных организаций целесообразно добавить к данному списку временное ограничение, связанное с наличием временных рамок раннего и позднего начала работ по проекту.

В различных исследованиях в зависимости от конкретных решаемых задач рассматриваются различные наборы ограничений при проведении планирования. Так, в [71] учитываются все приведенные ограничения, за исключением временного. В исследованиях [6–14, 20–22, 31, 63, 65, 68, 72] рассматриваются ограничения предшествования. Планирование без учета ограничений представлено в работах [58, 67] при планировании работы производственного участка и определении маршрута движения общественного транспорта.

2. Оптимизационный характер задачи планирования.

Оптимизационный характер задачи планирования связан с необходимостью генерации и анализа набора осуществимых (т.е. удовлетворяющих ограничениям) альтернативных календарных планов и выбора оптимального плана с точки зрения обеспечения экстремального значения выбранной целевой функции.

В существующих исследованиях объекты оптимизации различаются в зависимости от решаемых задач планирования. Классическая целевая функция задачи планирования по минимизации времени выполнения работ (*makespan minimisation*) применяется в исследованиях [6–27, 67, 71–76]. В качестве целевой функции в исследованиях [7, 8, 66, 69] выступает суммарное время отклонений выполнения работ от плановых сроков. Обе целевые функции рассматриваются в работах [32, 33, 68, 71, 72]. Целевая функция максимизации прибыли от выполнения проектов применяется в работах [13, 65].

Ни в одном из проанализированных исследований не рассматривается оптимизация привлекаемых субподрядных нескладируемых ресурсов, в то время как данная задача является актуальной для всех проектных организаций и даже для предприятий с серийным производством. Привлечение субподрядных ресурсов является одним из способов

адаптации к колебаниям спроса при сохранении постоянного состава собственных ресурсов.

Задача оптимизации субподрядных ресурсов связана с планированием распределения субподрядных ресурсов по операциям проектов с целью минимизации стоимости привлекаемого субподряда и максимизации загрузки собственных ресурсов, а также выравнивания функции потребления собственных ресурсов. В литературе анализ субподрядных ресурсов рассматривается на уровне задачи создания виртуального предприятия [77]: проводится анализ альтернативных субподрядчиков с точки зрения достижения равновесия «цена-качество».

Будем рассматривать задачу календарного планирования работ как задачу оптимизации показателей деятельности не только собственных нескладируемых ресурсов, но и субподрядных. В качестве целевой функций подобной задачи выберем минимизацию стоимости привлекаемого субподряда. В качестве ограничений задачи выступают временные ограничения раннего и позднего начала работ по каждой операции портфеля проектов и ограничения на наличие необходимого объема складированных ресурсов для выполнения операций.

1.2. Обзор методов планирования

1.2.1. Методы теории расписаний

Рассмотрим применение методов теории расписаний [7–27, 32, 33] к поставленной задаче планирования проектных работ.

В работах Гимади Э. Х. [9–13] решается задача календарного планирования (ЗКП), заключающаяся в составлении расписания минимальной длительности с учетом ограничений предшествования-следования, директивных сроков выполнения и ограничений на ресурсы складированного и нескладированного типа, прерывания работ не допускаются. ЗКП в [11] расширена критерием минимизации суммы отклонений потребляемых складированных ресурсов от ограничений, заданных на начало планирования. Рассматриваемая ЗКП в работах [12, 13] расширена критерием минимизации суммарных дисконтированных затрат, нормализованно-функциональным заданием информации о динамике потребления складированных ресурсов и введением понятия суперработа с длительностью, равной критическому времени выполнения входящих в нее работ. Для рассмотренных задач

Гимади Э. Х. предложен малотрудоемкий приближенный алгоритм, который на предварительном этапе преобразует исходные данные к сетевой модели и указывает на противоречия между ресурсными ограничениями и директивными сроками (которых не должно быть при работе алгоритма), а также решает задачу поиска критического пути без учета ограничений на ресурсы; на первом этапе алгоритм осуществляет расчет оценочного допустимого расписания в предположении складированности всех ресурсов; на втором этапе алгоритм ищет допустимое расписание с учетом ограничений на нескладированные ресурсы с помощью упаковки работ на временной оси с целью удовлетворения всех ресурсных ограничений и минимизации времени выполнения работ. При условии отсутствия противоречий между ресурсными ограничениями и директивными сроками наличие допустимого расписания минимальной длительности означает достижение критерием задачи, приведенной в [11], своего минимально возможного нулевого значения. В [13] суммарные дисконтированные затраты определены как сумма по всем операциям, ресурсам и временным интервалам произведения коэффициента дисконтирования на интенсивность потребления ресурса операцией в единичный интервал времени. Из данного определения следует, что при существовании расписания с минимальным временем выполнения данное расписание будет обеспечивать минимальное значение суммарных дисконтированных затрат. Для предложенного алгоритма в [9–13] приведена оценка точности и трудоемкости; показано, что в случае наличия только складированных ресурсов алгоритм позволяет находить асимптотически точное решение. Достоинствами алгоритма являются учет директивных сроков, рассмотрение ограниченных складированных и нескладированных ресурсов, приведенная оценка отклонения приближенного решения задачи от точного. Недостатком алгоритма является исключение из рассмотрения такого расположения работ на оси времени, при котором возникают противоречия между ресурсными ограничениями и директивными сроками, например, для работ критического пути наблюдается превышение доступности собственных нескладированных ресурсов. В данном случае предприятия применяют (или могут применять) субподрядные нескладированные ресурсы, затраты на которые необходимо оптимизировать. Данное обстоятельство остается за рамками работы рассматриваемого алгоритма.

Гимади Э. Х. в [14] приведена математическая постановка ЗКП с тремя типами ограниченных ресурсов: невозобновимыми, нескладируемыми (возобновимыми) и складированными. Невозобновимые ресурсы ограничиваются для всего проекта в целом и в ходе выполнения операций только потребляются. Нескладированные ресурсы представляют собой производственные мощности, людские ресурсы, используемые операцией в заданном количестве в пределах доступного на данный момент объема ресурса. Складированные ресурсы потребляются и производятся операциями в ходе выполнения проекта. Для каждого из указанных типов ресурсов Севастьяновым С. В. в [23] предложен универсальный способ формализации ограничений с помощью введения понятия пул ресурсов и определения векторов динамического и статического (или внешнего) воздействия работы на пул ресурсов. Ограничения на невозобновимые и нескладированные ресурсы задаются с помощью вектора динамического воздействия; ограничения на складированные ресурсы задаются с помощью вектора внешнего воздействия.

Гимади Э. Х. в [14] предложен малотрудоемкий приближенный алгоритм решения ЗКП, определяемой согласно [29–30] как $PS/prec/C_{max}$, с ограниченными складированными ресурсами и директивными сроками выполнения, прерывания не допускаются. Для предложенного алгоритма приведена оценка трудоемкости и нижняя оценка длины оптимального расписания. В ходе работы алгоритма исключаются из рассмотрения два случая как ситуации, при которых задача не имеет решения: 1) случай, когда наиболее раннее расписание, длина которого равна длине критического пути, не удовлетворяет ограничениям на директивные сроки работ, 2) случай, когда хотя бы для одного вида ресурса суммарный объем складированных ресурсов, требуемых для выполнения, строго превышает суммарный объем производимых ресурсов. Однако для первого случая решение может быть найдено с помощью привлечения сторонних (субподрядных) ресурсов для выполнения работ критического пути, а для второго случая решение может быть связано с осуществлением ЛПР гибких поставок складированных ресурсов в зависимости от текущего и требуемого объемов ресурсов. Описание сценариев привлечения субподрядных ресурсов и гибких поставок складированных ресурсов на основе знаний ЛПР поддерживается при использовании мультиагентного имитационного моделирования.

Севастьяновым С. В. в [24] рассматривается ЗКП с определением минимальной длины расписания при наличии ограничений на нескладируемые ресурсы и прерываний работ. Авторами введено понятие «миграционная задержка выполнения», связанное с естественной временной задержкой выполнения работы при ее прерывании и возобновлении выполнения на другой параллельной машине. Предложен малотрудоемкий приближенный алгоритм для случая двух машин $P2/pmtn(delay = d)/C_{max}$ с оценкой трудоемкости и качества решения. Достоинствами работы является расширение классической ЗКП миграционными задержками; к недостаткам относится рассмотрение ограничений только на нескладируемые ресурсы и отсутствие учета директивных сроков выполнения работ.

Гончаровым Е. Н. в [15, 16] рассматривается приведенная выше ЗКП, в которой не допускаются прерывания. В [15] предложен точный алгоритм на основе метода ветвей и границ с новой схемой ветвления и двумя новыми вариантами эффективных нижних оценок для неотсеченных решений. Одна оценка формируется при решении упрощенной задачи с допущением складированности всех ресурсов, другая оценка – при решении задачи с допущением единичной длительности выполнения работ. Показано, что алгоритм позволяет находить точные решения для задач планирования 30 работ; для большего числа работ (60 работ) алгоритм в общем случае не реализуем из-за размерности примеров. Достоинством предложенного алгоритма является его точность, к недостаткам можно отнести нереализуемость алгоритма при высокой размерности задачи планирования. В [16] для указанной ЗКП предложен эвристический метод на основе модифицированного генетического алгоритма для решения задач большой размерности. Модификация генетического алгоритма связана с понятием «плотного гена» – участка хромосомы, который кодирует последовательность работ, наиболее оптимально использующих нескладируемые ресурсы (с наименьшим остатком). Также в работе определяется дефицитность ресурса путем решения упрощенной задачи с допущением складированности всех ресурсов и определения остатков ресурсов (чем остаток меньше, тем ресурс дефицитнее). Качество предложенного алгоритма исследовано на примерах из электронной библиотеки тестовых задач. Достоинствами предложенного эвристического алгоритма являются ориентация на решение

задач большой размерности и высокое качество найденных решений; к недостаткам можно отнести отсутствие учета директивных сроков и ограничений на складироваемые ресурсы.

Кочетовым Ю. А. и Столяром А. А. в работах [25–27] рассматривается ЗКП с ограниченными нескладироваемыми ресурсами, ограничениями предшествования, задержками начала выполнения при условии минимизации длины расписания без учета прерываний и директивных сроков. Для данной задачи предложены три вероятностных жадных алгоритма; алгоритмы обеспечивают получение множества приближенных решений, которые затем используются в качестве начальных точек при применении алгоритмов локального спуска. Первый жадный алгоритм ранжирует работы по временным задержкам начала их выполнения. Вторым алгоритмом осуществляется поиск узких мест на ограниченных нескладироваемых ресурсах. Третий алгоритм осуществляет наиболее плотную «упаковку» доступных ресурсов. Авторами приведены оценки качества решений в сравнении с имеющейся библиотекой приближенных решений с помощью эвристических алгоритмов, в том числе генетических алгоритмов. Показано, что с увеличением размерности задачи до 120 работ рассмотренный алгоритм позволяет находить решения с лучшим значением целевой функции. Достоинствами алгоритма являются ориентация на большую размерность задачи планирования, сетевое представление работ, учет задержек начала выполнения работ. К недостаткам алгоритма можно отнести отсутствие учета складироваемых ресурсов, прерываний работ и директивных сроков выполнения, а также отсутствие возможности привлечения субподрядных нескладироваемых ресурсов для устранения узких мест, обнаруженных в процессе планирования.

Возможность применения методов ЗКП для решения задачи составления краткосрочного и долгосрочного расписания работы веб-студии с учетом нескладироваемых ресурсов и ограничений предшествования рассматривается Авдеенко Т. В. в [78]. Автором выделяются особенности процессов анализируемой предметной области и делается вывод о возможности применения методов ЗКП при введении ряда допущений. В случае долгосрочного планирования подчеркивается необходимость рассмотрения возможных превышений доступности собственных ресурсов для планирования руководителями либо увели-

чения объема собственных ресурсов, либо привлечения субподрядных ресурсов. Вопрос оптимизации затрат на привлечение субподрядных ресурсов в работе не рассматривается.

Для исследуемой задачи планирования одной из наиболее близких задач, изучаемых в рамках теории расписаний, является задача оптимизации расписаний параллельной системы с идентичными приборами при наличии задержек начала обслуживания заявок. Данная задача согласно нотации Грэхема записывается следующим образом:

$Pm/r_j/C_{max}$. Здесь Pm означает наличие в системе ограниченного числа параллельных идентичных приборов с одинаковым временем обработки заявки; r_j указывает на наличие задержек начала обслуживания заявок; C_{max} представляет собой критерий оптимизации, связанный с минимизацией времени окончания работ. Для указанной задачи Мезенцевым Ю. А. и Эстрайхом И. В. предложен параметрический алгоритм динамического программирования с отсевом вариантов [20–22].

Другой близкой задачей, изучаемой в рамках теории расписаний, является задача оптимизации расписаний параллельной системы с идентичными приборами при наличии заданных директивных сроков выполнения заявок. Данная задача согласно нотации Грэхема [33] записывается следующим образом: $Pm/pmtn, r_j/C_j \leq d_j$. Здесь $pmtn$ означает наличие прерываний в обслуживании любой заявки, $C_j \leq d_j$ представляет собой критерий оптимизации, связанный с обслуживанием всех заявок в заданные сроки d_j . Танаевым В. С. в [8] приведен алгоритм построения расписания с обслуживанием в заданные сроки.

Рассмотренные алгоритмы (Мезенцева Ю. А. и Танаева В. С.) были применены для решения тестовой задачи малой размерности (число собственных ресурсов $I = 2$, число операций $J = 7$). Ход решения задач приведен ниже.

Рассмотрим применение параметрического алгоритма с отсеком вариантов Мезенцева Ю. А. для решения задачи календарного планирования в следующей постановке. Обозначим через $x_{i,j}$ булевы переменные назначения заявки j на прибор i , через t_j – время обслуживания заявки j , через τ_j^0 – задержку поступления заявки j (считаем, что заявки упорядочены по возрастанию τ_j^0). Пусть $\hat{t}_{i,j}$ представляют собой фактические задержки начала выполнения j -й заявки i -м прибором после завершения обслуживания им предшествующей заявки.

Обозначим номера этапов динамического программирования $s = \overline{1, J}$. Обозначим через $f_{i,s}(\tau_s^0, t_s, x_{i,s})$, $i = \overline{1, I}$ время завершения обслуживания прибором i заявки j на этапе s , а через $\varphi_s(\tau_j^0, t_j, x_{i,j})$, $j = \overline{1, S}$, $i = \overline{1, I}$ – условно минимальное время завершения обслуживания всех принятых заявок на этапах с первого по s -ый. Формулы расчета указанных величин приведены ниже [20].

$$f_{i,s}(\tau_s^0, t_s, x_{i,s}) = \max\{0, [\tau_s^0 x_{i,s} - \varphi_{i,s-1}(\tau_{s-1}^0, t_j, x_{i,j})]\} + t_s x_{i,s},$$

$$i = \overline{1, I}, j = \overline{1, J} \quad (1.1)$$

$$\varphi_{i,s}(\tau_j^0, t_j, x_{i,j}) = \{f_{i,s}(\tau_s^0, t_s, x_{i,s}) + \varphi_{i,s-1}(\tau_j^0, t_j, x_{i,j})\},$$

$$j = \overline{1, s-1} \quad (1.2)$$

$$\varphi_s(\tau_j^0, t_j, x_{i,j}) = \max_i \{\varphi_{i,s}(\tau_s^0, t_j, x_{i,j})\}, j = \overline{1, S}, i = \overline{1, I} \quad (1.3)$$

Параметрический алгоритм включает в себя следующие шаги.

1. Ввод исходных данных (τ_j^0, t_j) , $i = \overline{1, I}, j = \overline{1, J}$, и параметров k, K' . Задание $\varphi_{i,0}(\tau_0^0, t_j, x_{i,j}) = 0$, определение начального номера шага $s := 0$.

2. $s := s + 1$

3. Проверка номера этапа. Если $s > J$, то переход к п. 7, иначе к п. 4.

4. Генерация всех допустимых вариантов расписания, вычисление $f_{i,s}(\tau_s^0, t_s, x_{i,s})$ и длины расписаний $\varphi_{i,s}(\tau_j^0, t_j, x_{i,j})$

5. Проверка числа сгенерированных вариантов N_s . Если $N_s \leq K'$, то переход к п.2. В противном случае следующий пункт.

6. Отсев I^{k-1} из всех порожденных в п.4 вариантов с наибольшими значениями длины расписания $\varphi_{i,s}(\tau_j^0, t_j, x_{i,j})$. Переход к п.2.

7. Выбор вариантов кратчайших расписаний. Составление расписаний обратным ходом динамического программирования.

Рассмотрим задачу планирования проектных работ малой размерности.

Пусть в параллельную систему, состоящую из двух идентичных приборов, одновременно поступает семь заявок (операций). Данные о нормах времени выполнения операций и задержках поступления операций (времени раннего начала операций) приведены в таблице 1.1. Считаем, что операции упорядочены по времени раннего начала. Также в таблице указаны времена позднего окончания выполнения операций, которые не учитываются алгоритмом, но оказывают влияние на синтез расписания ЛПР.

Т а б л и ц а 1.1

Исходные данные тестовой задачи планирования

| Номер операции, j | Длительность операции, t_j | Время раннего начала, r_j | Время позднего окончания, d_j |
|---------------------|------------------------------|-----------------------------|---------------------------------|
| 1 | 2 | 0 | 3 |
| 2 | 3 | 0 | 4 |
| 3 | 2 | 1 | 4 |
| 4 | 4 | 2 | 7 |
| 5 | 3 | 3 | 7 |
| 6 | 2 | 5 | 8 |
| 7 | 4 | 5 | 10 |

Применение параметрического алгоритма с отсевом вариантов для решения тестового примера отображено ниже в последовательности таблиц 1.2–1.8, каждая из которых соответствует этапу динамического программирования. Примем $k = 2$, $K' = 2^2 = 4$.

Т а б л и ц а 1.2

Результаты первого этапа параметрического алгоритма

| Этап 1 | $x_{1,1}$ | $x_{2,1}$ | $f_{i,1}$ | $\varphi_{i,1} = f_{i,1}$, $\varphi_1 = \max_i \{\varphi_{i,1}\}$ |
|-----------|-----------|-----------|-----------------------------|--|
| Операция1 | 1 | 0 | $(\max\{0,0-0\}+2,0)=(2,0)$ | $\varphi_1 = \max\{2,0\}=2$ |
| | 0 | 1 | $(0,\max\{0,0-0\}+2)=(0,2)$ | $\varphi_1 = \max\{0,2\}=2$ |

Т а б л и ц а 1.3

Результаты второго этапа параметрического алгоритма

| Этап 2 | $x_{1,1}$ | $x_{2,1}$ | $x_{1,2}$ | $x_{2,2}$ | $f_{i,2}$ | $\varphi_{i,2} = \{f_{i,2} + \varphi_{i,1}\}$, $\varphi_2 = \max_i \{\varphi_{i,2}\}$ |
|-------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------------------------|---|
| Операция1+ Операция2 | 1 | 0 | 1 | 0 | $(\max\{0,0-2\}+3,0)=(3,0)$ | $\varphi_2 = \max\{2+3,0+0\}=5$ |
| | 1 | 0 | 0 | 1 | $(0,\max\{0,0-2\}+3)=(0,3)$ | $\varphi_2 = \max\{2+0,0+3\}=3$ |
| | 0 | 1 | 1 | 0 | $(\max\{0,0-2\}+3,0)=(3,0)$ | $\varphi_2 = \max\{0+3,2+0\}=3$ |
| | 0 | 1 | 0 | 1 | $(0,\max\{0,0-2\}+3)=(0,3)$ | $\varphi_2 = \max\{0+0,2+3\}=5$ |

Заливкой в таблице 1.4 выделены строки, которые соответствуют вариантам назначений, имеющих локально наилучшие оценки длины расписания. Остальные строки из рассмотрения исключаются.

Таблица 1.4

Результаты третьего этапа параметрического алгоритма

| Этап 3 | $x_{1,1}$ | $x_{2,1}$ | $x_{1,2}$ | $x_{2,2}$ | $x_{1,3}$ | $x_{2,3}$ | $f_{i,3}$ | $\varphi_{i,3} = \{f_{i,3} + \varphi_{i,2}\},$ $\varphi_3 = \max_i \{\varphi_{i,3}\}$ |
|---------------------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|----------------------------------|--|
| Операция1+ Операция2+ Операция3 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | $(\max\{0, 1-5\}+2, 0) = (2, 0)$ | $\varphi_3 = \max\{2+3+2, 0+0+0\}=7$ |
| | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | $(0, \max\{0, 1-0\}+2) = (0, 3)$ | $\varphi_3 = \max\{2+3+0, 0+0+3\}=5$ |
| | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | $(\max\{0, 1-2\}+2, 0) = (2, 0)$ | $\varphi_3 = \max\{2+0+2, 0+3+0\}=4$ |
| | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | $(0, \max\{0, 1-3\}+2) = (0, 2)$ | $\varphi_3 = \max\{2+0+0, 0+3+2\}=5$ |
| | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | $(\max\{0, 1-3\}+2, 0) = (2, 0)$ | $\varphi_3 = \max\{0+3+2, 2+0+0\}=5$ |
| | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | $(0, \max\{0, 1-2\}+2) = (0, 2)$ | $\varphi_3 = \max\{0+3+0, 2+0+2\}=4$ |
| | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | $(\max\{0, 1-0\}+2, 0) = (3, 0)$ | $\varphi_3 = \max\{0+0+3, 2+3+0\}=5$ |
| | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | $(0, \max\{0, 1-5\}+2) = (0, 2)$ | $\varphi_3 = \max\{0+0+0, 2+3+2\}=7$ |

Заливкой в таблицах 1.5–1.8 выделены строки, которые имеют локально наилучшие промежуточные оценки длины расписания для соответствующих этапов. В таблице 1.9 представлены четыре найденных варианта расписания.

Таблица 1.5

Результаты четвертого этапа параметрического алгоритма

| Этап 4 | $x_{1,2}$ | $x_{2,2}$ | $x_{1,3}$ | $x_{2,3}$ | $x_{1,4}$ | $x_{2,4}$ | $f_{i,4}$ | $\varphi_{i,4} = \{f_{i,4} + \varphi_{i,3}\},$ $\varphi_4 = \max_i \{\varphi_{i,4}\}$ |
|---|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-------------------------------|--|
| Операция1+ Операция2+ Операция3+ Операция4 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | $(\max \{0,2-7\}+4,0)=(4,0)$ | $\varphi_4 = \max \{2+3+0+4,0+0+3+0\}=9$ |
| | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | $(0, \max \{0,2-3\}+4)=(0,4)$ | $\varphi_4 = \max \{2+3+0+0,0+0+3+4\}=7$ |
| | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | $(\max \{0,2-4\}+4,0)=(4,0)$ | $\varphi_4 = \max \{2+0+2+4,0+3+0+0\}=8$ |
| | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | $(0, \max \{0,2-3\}+4)=(0,4)$ | $\varphi_4 = \max \{2+0+2+0,0+3+0+4\}=7$ |
| | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | $(\max \{0,2-3\}+4,0)=(4,0)$ | $\varphi_4 = \max \{0+3+0+4,2+0+2+0\}=7$ |
| | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | $(0, \max \{0,2-4\}+4)=(0,4)$ | $\varphi_4 = \max \{0+3+0+0,2+0+2+4\}=8$ |
| | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | $(\max \{0,2-3\}+4,0)=(4,0)$ | $\varphi_4 = \max \{0+0+3+4,2+3+0+0\}=7$ |
| | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | $(0, \max \{0,2-5\}+4)=(0,4)$ | $\varphi_4 = \max \{0+0+3+0,2+3+0+4\}=9$ |

Таблица 1.6

Результаты пятого этапа параметрического алгоритма

| Этап 5 | $x_{1,3}$ | $x_{2,3}$ | $x_{1,4}$ | $x_{2,4}$ | $x_{1,5}$ | $x_{2,5}$ | $f_{i,5}$ | $\varphi_{i,5} = \{f_{i,5} + \varphi_{i,4}\},$ $\varphi_5 = \max_i \{\varphi_{i,5}\}$ |
|---|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-------------------------------|--|
| Операция1+ Операция2+ Операция3+ Операция4+ Операция5 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | $(\max \{0,3-5\}+3,0)=(3,0)$ | $\max \{2+3+0+0+3,0+0+3+4+0\}=8$ |
| | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | $(0, \max \{0,3-7\}+3)=(0,3)$ | $\max \{2+3+0+0+0,0+0+3+4+3\}=10$ |
| | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | $(\max \{0,3-4\}+3,0)=(3,0)$ | $\max \{2+0+2+0+3,0+3+0+4+0\}=7$ |
| | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | $(0, \max \{0,3-7\}+3)=(0,3)$ | $\max \{2+0+2+0+0,0+3+0+4+3\}=10$ |
| | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | $(\max \{0,3-7\}+3,0)=(3,0)$ | $\max \{0+3+0+4+3,2+0+2+0+0\}=10$ |
| | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | $(0, \max \{0,3-4\}+3)=(0,3)$ | $\max \{0+3+0+4+0,2+0+2+0+3\}=7$ |
| | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | $(\max \{0,3-7\}+3,0)=(3,0)$ | $\max \{0+0+3+4+3,2+3+0+0+0\}=10$ |
| | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | $(0, \max \{0,3-5\}+3)=(0,3)$ | $\max \{0+0+3+4+0,2+3+0+0+3\}=8$ |

Таблица 1.7

Результаты шестого этапа параметрического алгоритма

| Этап 6 | $x_{1,4}$ | $x_{2,4}$ | $x_{1,5}$ | $x_{2,5}$ | $x_{1,6}$ | $x_{2,6}$ | $f_{i,6}$ | $\varphi_{i,6} = \{f_{i,6} + \varphi_{i,5}\}, \varphi_6 = \max_i \{\varphi_{i,6}\}$ |
|------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|------------------------------|---|
| Операция1+ | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | $(\max\{0,5-8\}+2,0)=(2,0)$ | $\max\{2+3+0+0+3+2, 0+0+3+4+0+0\}=10$ |
| Операция2+ | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | $(0, \max\{0,5-7\}+2)=(0,2)$ | $\max\{2+3+0+0+3+0, 0+0+3+4+0+2\}=9$ |
| Операция3+ | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | $(\max\{0,5-7\}+2,0)=(2,0)$ | $\max\{2+0+2+0+3+2, 0+3+0+4+0+0\}=9$ |
| Операция4+ | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | $(0, \max\{0,5-7\}+2)=(0,2)$ | $\max\{2+0+2+0+3+0, 0+3+0+4+0+2\}=9$ |
| Операция5+ | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | $(\max\{0,5-7\}+2,0)=(2,0)$ | $\max\{0+3+0+4+0+2, 2+0+2+0+3+0\}=9$ |
| Операция6 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | $(0, \max\{0,5-7\}+2)=(0,2)$ | $\max\{0+3+0+4+0+0, 2+0+2+0+3+2\}=9$ |
| | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | $(\max\{0,5-7\}+2,0)=(2,0)$ | $\max\{0+0+3+4+0+2, 2+3+0+0+3+0\}=9$ |
| | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | $(0, \max\{0,5-8\}+2)=(0,2)$ | $\max\{0+0+3+4+0+0, 2+3+0+0+3+2\}=10$ |

Таблица 1.8

Результаты седьмого этапа параметрического алгоритма

| Этап 7 | $x_{1,5}$ | $x_{2,5}$ | $x_{1,6}$ | $x_{2,6}$ | $x_{1,7}$ | $x_{2,7}$ | $f_{i,7}$ | $\varphi_{i,7} = \{f_{i,7} + \varphi_{i,6}\}, \varphi_7 = \max_i \{\varphi_{i,7}\}$ |
|------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|------------------------------|---|
| Операция1+ | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | $(\max\{0,5-8\}+4,0)=(4,0)$ | $\max\{2+3+0+0+3+0+4, 0+0+3+4+0+2+0\}=12$ |
| Операция2+ | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | $(0, \max\{0,5-9\}+4)=(0,4)$ | $\max\{2+3+0+0+3+0+0, 0+0+3+4+0+2+4\}=13$ |
| Операция3+ | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | $(\max\{0,5-9\}+4,0)=(4,0)$ | $\max\{2+0+2+0+3+2+4, 0+3+0+4+0+0+0\}=13$ |
| Операция4+ | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | $(0, \max\{0,5-7\}+4)=(0,4)$ | $\max\{2+0+2+0+3+2+0, 0+3+0+4+0+0+4\}=11$ |
| Операция5+ | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | $(\max\{0,5-7\}+4,0)=(4,0)$ | $\max\{2+0+2+0+3+0+4, 0+3+0+4+0+2+0\}=11$ |
| Операция6+ | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | $(0, \max\{0,5-9\}+4)=(0,4)$ | $\max\{2+0+2+0+3+0+0, 0+3+0+4+0+2+4\}=13$ |
| Операция7 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | $(\max\{0,5-9\}+4,0)=(4,0)$ | $\max\{0+3+0+4+0+2+4, 2+0+2+0+3+0+0\}=13$ |
| | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | $(0, \max\{0,5-7\}+4)=(0,4)$ | $\max\{0+3+0+4+0+2+0, 2+0+2+0+3+0+4\}=11$ |
| | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | $(\max\{0,5-7\}+4,0)=(4,0)$ | $\max\{0+3+0+4+0+0+4, 2+0+2+0+3+2+0\}=11$ |
| | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | $(0, \max\{0,5-9\}+4)=(0,4)$ | $\max\{0+3+0+4+0+0+0, 2+0+2+0+3+2+4\}=13$ |
| | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | $(\max\{0,5-9\}+4,0)=(4,0)$ | $\max\{0+0+3+4+0+2+4, 2+3+0+0+3+0+0\}=13$ |
| | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | $(0, \max\{0,5-9\}+4)=(0,4)$ | $\max\{0+0+3+4+0+2+0, 2+3+0+0+3+0+4\}=12$ |

Таблица 1.9

Варианты назначений с минимальной длиной расписания

| Вариант | $x_{1,1}$ | $x_{2,1}$ | $x_{1,2}$ | $x_{2,2}$ | $x_{1,3}$ | $x_{2,3}$ | $x_{1,4}$ | $x_{2,4}$ | $x_{1,5}$ | $x_{2,5}$ | $x_{1,6}$ | $x_{2,6}$ | $x_{1,7}$ | $x_{2,7}$ | φ_7 |
|---------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-------------|
| 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 11 |
| 2 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 11 |
| 3 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 11 |
| 4 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 11 |

Поскольку приборы идентичны, то нетрудно заметить, что вариант 1 идентичен варианту 4, а вариант 2 идентичен варианту 3. Варианты 1 и 2 различаются назначением последних двух работ на два ресурса. Для всех вариантов наблюдается нарушение времени позднего окончания выполнения операций для операций с номерами 6 и 7.

На рисунке 1.1 приведены графики полученных расписаний.

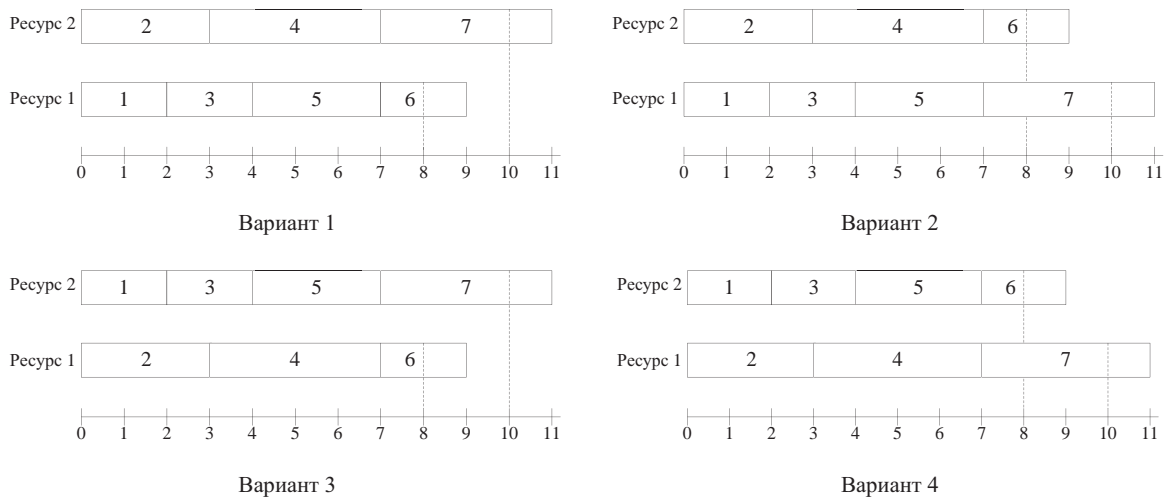


Рис. 1.1. Графики расписаний с минимальным временем выполнения

Найденные с помощью алгоритма Мезенцева Ю. А. решения задачи оптимизации расписаний параллельной системы с идентичными приборами при наличии задержек начала обслуживания заявок не обеспечивают выполнение временных ограничений, накладываемых на сроки выполнения заявок. В данной задаче не анализируются субподрядные ресурсы и временные ограничения на момент окончания выполнения заявок, в то время как данные условия характерны для рассматриваемой задачи календарного планирования проектных работ.

Рассмотрим алгоритм, предложенный Танаевым В. С. и применим его для решения тестовой задачи.

Пусть $e_1 < e_2 < \dots < e_{p+1}$ ($p \leq 2J - 1$) множество всех различных значений r_j и d_j ($j = \overline{1, J}$), $E_k = (e_k; e_{k+1}]$ и $\Delta_k = e_{k+1} - e_k$, ($k = \overline{1, p}$). Обозначим через $n(k)$ число всех требований $j \in N$, таких, что $E_k \subseteq (r_j, D_j]$.

Зададим число приборов $M = \max_k n(k)$, тогда для $k = \overline{1, p}$ $n(k) \leq M$. При этом возможны два варианта: 1) $M \leq I$ – когда приборов достаточно для выполнения всех требований на интервалах E_k ; 2) $M > I$ – когда приборов не достаточно для выполнения всех требований на интервалах E_k и приходится привлекать сторонние приборы в количестве $M' < (M - I)$.

Процедура построения расписания для задачи $Pm/pmtn, r_j/C_j \leq d_j$, предложенная в [8], включает в себя выполнение следующих шагов. Данная процедура была расширена шагами 4–7 с целью снижения числа прерываний.

1. $k := 0$.

2. Следующий интервал $k := k + 1$. Если $k > p$, то переход на п.9, иначе выполнение следующих действий. Формируем множество требований $N_k = \{j_{k,1}, j_{k,2}, \dots, j_{k,n(k)}\}$, которые могут обслуживаться в интервале E_k : $E_k \subseteq (r_j, D_j]$ и $t_j \neq 0$, $j = \overline{1, J}$. Требования отсортированы по убыванию стоимости выполнения работ в единицу времени.

3. Если $\min_{j \in N_k} \{t_j\} < \Delta_k$, то переход на п. 8, иначе следующий пункт.

4. Начинаем просматривать множество всех приборов I : $i := 0$.

5. Следующий прибор: $i := i + 1$. Если ($i > M$) ИЛИ ($N_k = \emptyset$), то переход на п.2, иначе начинаем заново просматривать множество N_k : $L := 0$.

6. Следующее требование из множества N_k : $L := L + 1$. Если $L > n(k)$, то переход на п.5, иначе следующий пункт.

7. Назначение прибора i на требование $j_{k,L} \in N_k$ и формирование расписания $S_{ki}(t)$ на интервале E_k .

7.1. Если ($k = 1$) ИЛИ ($k \neq 1$ и требование $j_{k,L}$ на предыдущем интервале E_{k-1} не назначалось на прибор $i' \neq i$) ИЛИ ($k \neq 1$ и требование $j_{k,L}$ на предыдущем интервале E_{k-1} назначалось на прибор $i' \neq i$, $i' > I$ и выполняется $n(k) \leq I$), то назначаем прибор i на требование $j_{k,L}$.

7.1.1. $t_{j_{k,L}} := t_{j_{k,L}} - \Delta_k$, $S_{k,i}(t) := j_{k,L}$ при $t = (e_k; e_{k+1}]$.

7.1.2. Исключаем требование $j_{k,L}$ из множества N_k . Переход на п.5.

7.2. Если ($k \neq 1$ и требование $j_{k,L}$ на предыдущем интервале E_{k-1} назначалось на прибор $i' \neq i, i' \leq I$) ИЛИ ($k \neq 1$ и требование $j_{k,L}$ на предыдущем интервале E_{k-1} назначалось на прибор $i' \neq i, i' > I$ и $n(k) > I$), то переход на п.6.

8. Задание для каждого требования из множества N_k длительности согласно формуле:

$$t_j' := \begin{cases} t_j, & t_j < \Delta_k \\ \Delta_k, & t_j \geq \Delta_k \end{cases}, \quad j \in N_k.$$

Применение алгоритма упаковки, реализующего назначение на интервале E_k требований множества N_k с длительностями выполнения t_j' на приборы множества M . При этом $t_j' \leq \Delta_k, j \in N_k$ и $\sum_{j \in N_k} t_j' \leq M\Delta_k$.

8.1. Зададим на интервале $(e_k; e_k + M\Delta_k]$ функцию $\sigma(t)$, полагая: $\sigma(t) = j_{k,1}$ на интервале $(e_k; e_k + t_{j_{k,1}}]$;

$\sigma(t) = j_{k,Q}$ на интервале $(e_k + \sum_{q=1}^{Q-1} t_{j_{k,q}}; e_k + \sum_{q=1}^Q t_{j_{k,q}}]$, $Q = \overline{2, n(k)}$; если $\sum_{j \in N_k} t_j < M\Delta_k$, то $\sigma(t) = 0$ на $(e_k + \sum_{j \in N_k} t_j; e_k + M\Delta_k]$.

8.2. Формирование расписания $S_{k,i}(t) = \sigma(t + (i-1)\Delta_k)$, $i = \overline{1, M}$.

8.3. $t_j := t_j - t_j'$, $j \in N_k$. Переход на п.2.

9. Конец алгоритма.

Проведем оценку результатов работы алгоритма построения расписания с обслуживанием в заданные сроки на примере решения тестовой задачи планирования, исходные данные которой представлены в таблице 1.1. Примем, что стоимости выполнения всех операций в единицу времени одинаковы и равны W . Отсортируем множество операций J согласно таблице 1.1. Выделим множество $\{e_{k+1}\}$ всех различных значений r_j и d_j , число таких значений $p+1=9$; данное множество формирует $p=8$ интервалов $E_k, k = \overline{1, 8}$. На рисунке 1.2 приведены интервалы E_k и значения e_{k+1} .

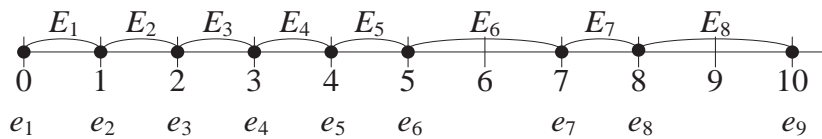


Рис. 1.2. Рассматриваемые интервалы требований тестовой задачи

Поскольку $\max_k n(k) = 4$, следовательно, примем число ресурсов равным четырем. Однако в процессе поиска расписания максимальное число используемых ресурсов оказалось равным трем за счет назначения двух операций на интервале E_6 для выполнения одним ресурсом i_1 , следовательно, примем $M = 3$. При этом $I = 2$ – заданное количество собственных ресурсов, $M' = 1$ – количество привлекаемых субподрядных ресурсов. Сформированное в результате расписание приведено на рисунке 1.3.

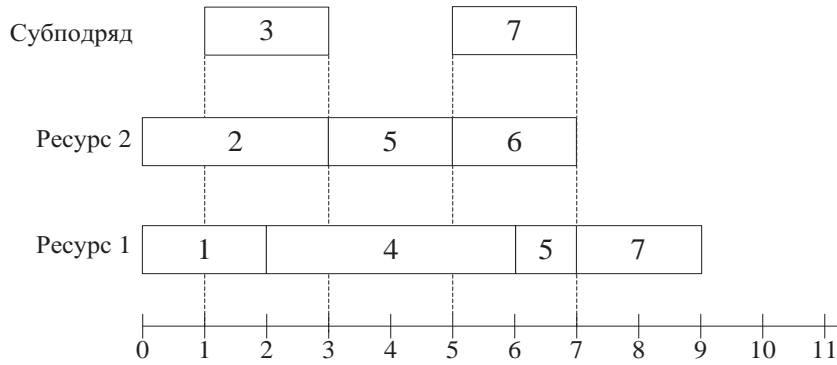


Рис. 1.3. График расписания, найденного с помощью процедуры построения расписания с заданными директивными сроками

Применение процедуры построения расписания приведено в таблице 1.10.

Зададим для субподрядных ресурсов $i = \overline{I, M}$ функцию $\mu_i(t)$ следующим образом:

$$\mu_i(t) = \begin{cases} 1, & \text{если } S_{k,i} \neq 0, \\ 0, & \text{иначе} \end{cases} \quad t \in E_k.$$

Будем рассчитывать для рассматриваемой задачи стоимость привлекаемых субподрядных ресурсов:

$$F = W \sum_{t=1}^{e_{p+1}} \sum_{i=I}^M \mu_i(t) \quad (1.4)$$

Для расписания рассматриваемой задачи, найденного с помощью процедуры, приведенной в [8], и представленного на рисунке 1.5, стоимость субподрядных ресурсов составляет $F = 4W$.

Таблица 1.10

Синтез расписания с обслуживанием в заданные сроки

| Интервал E_k и его длина Δ_k | Множество N_k | Расписание $S_{k,i}, i = \overline{1, M}$ | Длина $t_j, i \in N_k$ | Функция $\sigma(t), \min_{j \in N_k} \{t_j\} < \Delta_k$ |
|--|--------------------------------|--|--|--|
| $E_1 = (0; 1]$ $\Delta_1 = 1$ | $N_1 = \{j_1, j_2\}$ | $S_{1,1}(t) := j_1$ $S_{1,2}(t) := j_2$ $S_{1,3}(t) := 0$ | $t_1 := 2-1=1$ $t_2 := 3-1=2$ | |
| $E_2 = (1; 2]$ $\Delta_2 = 1$ | $N_2 = \{j_1, j_2, j_3\}$ | $S_{2,1}(t) := j_1$ $S_{2,2}(t) := j_2$ $S_{2,3}(t) := j_3$ | $t_1 := 1-1=0$ $t_2 := 2-1=1$ $t_3 := 2-1=1$ | |
| $E_3 = (4; 5]$ $\Delta_3 = 1$ | $N_3 = \{j_2, j_3, j_4\}$ | $S_{3,1}(t) := j_4$ $S_{3,2}(t) := j_2$ $S_{3,3}(t) := j_3$ | $t_4 := 4-1=3$ $t_2 := 1-1=0$ $t_3 := 1-1=0$ | |
| $E_4 = (3; 4]$ $\Delta_4 = 1$ | $N_4 = \{j_4, j_5\}$ | $S_{4,1}(t) := j_4$ $S_{4,2}(t) := j_5$ $S_{4,3}(t) := 0$ | $t_4 := 3-1=2$ $t_5 := 3-1=2$ | |
| $E_5 = (4; 5]$ $\Delta_5 = 1$ | $N_5 = \{j_4, j_5\}$ | $S_{5,1}(t) := j_4$ $S_{5,2}(t) := j_5$ $S_{5,3}(t) := 0$ | $t_4 := 2-1=1$ $t_5 := 2-1=1$ | |
| $E_6 = (5; 7]$ $\Delta_6 = 2$ | $N_6 = \{j_4, j_5, j_6, j_7\}$ | $S_{6,1}(t) := \begin{cases} j_4 & \text{при } t \in (5; 6] \\ j_5 & \text{при } t \in (6; 7] \end{cases}$ $S_{6,2}(t) := j_6$ $S_{6,3}(t) := j_7$ | $t_4 := 1-1=0$ $t_5 := 1-1=0$ $t_6 := 2-2=0$ $t_7 := 4-2=2$ | $\sigma(t) := \begin{cases} j_4 & \text{при } t \in (5; 6] \\ j_5 & \text{при } t \in (6; 7] \\ j_6 & \text{при } t \in (7; 9] \\ j_7 & \text{при } t \in (9; 11] \end{cases}$ |
| $E_7 = (7; 8]$ $\Delta_7 = 1$ | $N_7 = \{j_7\}$ | $S_{7,1}(t) := j_7$ $S_{7,2}(t) := 0$ $S_{7,3}(t) := 0$ | $t_7 := 2-1=1$ | |
| $E_8 = (8; 10]$ $\Delta_8 = 2$ | $N_8 = \{j_7\}$ | $S_{8,1}(t) := \begin{cases} j_7 & \text{при } t \in (8; 9] \\ 0 & \text{при } t \in (9; 10] \end{cases}$ $S_{8,2}(t) := 0$ $S_{8,3}(t) := 0$ | $t_7 := 1-1=0$ | $\sigma(t) := \begin{cases} j_7 & \text{при } t \in (8; 9] \\ 0 & \text{при } t \in (9; 10] \end{cases}$ |

Найденное с помощью алгоритма Танаева В. С. расписание не является эффективным с точки зрения снижения стоимости субподряда, поскольку существует расписание с меньшим значением функции F . Пример более эффективного расписания с применением субподряда и соблюдением директивных сроков приведен на рисунке 1.4, стоимость субподряда $F = 2W$.

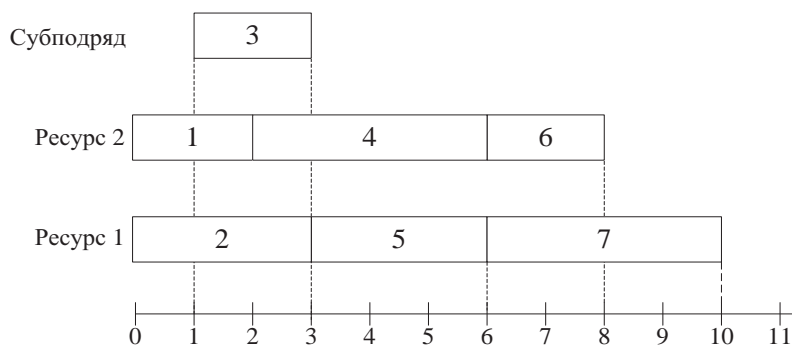


Рис. 1.4. График наиболее эффективного расписания

На основании проведенного поиска решения тестовой задачи планирования выполнен анализ рассмотренных алгоритмов теории расписаний с точки зрения их применимости к решаемой задаче планирования. Был сделан вывод об ограниченности применения методов теории расписаний к рассматриваемой задаче планирования.

Результаты анализа рассмотренных алгоритмов теории расписаний приведены в следующем разделе в таблице 1.11 в сравнении с методом критического пути (МКП).

1.2.2. Сетевые методы планирования

Практическая популярность сетевых методов планирования связана с широким распространением производственных систем с сетевым представлением технологических процессов и ограниченными ресурсами [79].

Метод сетевого планирования, исходя из логики выполнения и длительности работ, позволяет рассчитать наиболее раннюю дату завершения проекта и определить критический путь, то есть выявить работы, которые имеют нулевой резерв времени. Для распределения ресурсов по работам проектов применяются специальные алгоритмы, которые назначают приоритеты работам.

Сетевые методы планирования имеют несколько поколений, которые включают в себя МКП, методы PERT, GERT [34, 37]. МКП предназначен для определения критического пути и резервного времени работ для задачи планирования с детерминированными временами выполнения операций. Метод PERT обобщает метод критического пути на случай вероятностного задания времен выполнения операций. Метод GERT расширяет метод PERT за счет учета вероятностей реализации отдельных операций.

Важным аспектом работы сетевых методов является наличие отношений предшествования-следования, поскольку с помощью анализа данных отношений и длительностей операций происходит расчет критического пути. Однако, существует ряд задач планирования, для которых отношения предшествования не задаются, например, задачи разработки документации на готовые технические решения. Кроме того, сетевые методы, как показано авторами монографии в работе [80], имеют ограничения по описанию жизненного цикла складываемых ресурсов: поставки, потребления и времени жизни ресурсов.

Сравнительный анализ задач планирования, решаемых рассмотренными алгоритмами теории расписаний и МКП, приведен в таблице 1.11. Для всех рассмотренных алгоритмов авторами приводится оценка отклонения приближенного решения задачи от точного и трудоемкость поиска решения. Для точного алгоритма Севастьянова С. В. установлена граница реализуемости алгоритма при достижении размерности решаемой задачи в 60 операций.

Как следует из анализа, задачи календарного планирования отличаются большим разнообразием в постановке и учете ограничений, что влечет за собой возникновение большого числа различных приближенных алгоритмов для решения подобных задач, учитывающих те или иные ограничения и требования к предметной области. С данной точки зрения наиболее универсальными являются алгоритмы Гимади Э. Х. и МКП, учитывающие при планировании ограничения на складываемые и нескладываемые ресурсы (только алгоритмы Гимади Э. Х.), возможность включения операций в отдельные проекты, сетевое представление операций, директивные сроки выполнения, приоритетность операций, возможность прерываний (только МКП). Кроме того, данные алгоритмы реализованы в специализированном программном обеспечении: метод Гимади Э. Х. в комплексе «Сибирь-ВСНГК» [13]; метод МКП в программе MS Project.

Таблица 1.11

Сравнительный анализ применимости алгоритмов теории расписания и МКП к задаче календарного планирования проектных работ

| Критерий оценки | Алгоритм Гимади Э.Х. | МКП | Алгоритм Танаева В.С. | Алгоритм Мезенцева Ю.А. | Алгоритм Гончарова Е.Н. | Алгоритм Севастьянова С.В. |
|---|-------------------------|------------------------|---------------------------|----------------------------|----------------------------|-------------------------------|
| 1. Входные данные операции | | | | | | |
| 1.1 Длительность | Да | Да | Да | Да | Да | Да |
| 1.2 Задержка поступления операции | Нет | Да | Да | Да | Нет | Да |
| 1.3 Сроки раннего начала выполнения | Да | Да | Нет | Да | Нет | Нет |
| 1.4 Директивные сроки | Да | Да | Да | Нет | Нет | Нет |
| 1.5 Приоритет | Да | Да | Нет | Да | Нет | Нет |
| 1.6 Прерывания | Нет | Да | Да | Нет | Нет | Да |
| 1.7 Принадлежность проекту | Да | Да | Нет | Нет | Нет | Нет |
| 1.8 Стоимость | Да | Да | Нет | Нет | Нет | Нет |
| 1.9 Сетевое представление | Да | Да | Нет | Да | Нет | Нет |
| 2. Ограничения на ресурсы | | | | | | |
| 2.1 Складированные ресурсы: производство / потребление / время жизни ресурсов | Да / Да / Нет | Нет | Нет | Нет | Нет | Нет |
| 2.2 Нескладированные ресурсы | Да | Да | Да | Да | Да | Да |
| 3. Целевая функция | | | | | | |
| 3.1 Минимальная длительность расписания | Да | Да | Соблюдение директ. сроков | Да | Да | Да |
| 3.2 Минимальные затраты на субподряд | Нет | Нет | Нет | Нет | Нет | Нет |
| 4. Период планирования | Долго-срочное | Кратко-и долго-срочное | Кратко-срочное | Кратко-срочное | Кратко-срочное | Кратко-срочное |

Существуют следующие ограничения применения данных алгоритмов к рассматриваемой задаче планирования работ: 1) не учитывается время жизни складированных ресурсов (определяемое, например, схватываемостью бетона в строительстве или остыванием стали в металлургическом производстве); 2) отсутствует учет заданных сроков раннего начала операций; 3) отсутствует поиск оптимального назначения нескладированных ресурсов на работы с точки зрения минимизации стоимости привлекаемого субподряда.

Наличие указанных ограничений свидетельствует о необходимости применения дополнительных методов решения рассматриваемой задачи планирования проектных работ, а именно имитационного дискретно-событийного моделирования, с целью учета выделенных факторов.

1.2.3. Имитационные и мультиагентные методы планирования

Имитационная модель (ИМ) – это компьютерная модель системы, предназначенная для проведения над ней экспериментов. Имитационное моделирование используется для получения характеристик системы (производительности, надежности), анализа статистических данных и выявления оптимальной конфигурации и значений параметров сложных систем.

Процесс планирования с помощью имитационного моделирования начинается с рассмотрения некоторого начального осуществимого плана, полученного экспериментальным путем или на основании данных, отражающих существующую ситуацию на предприятии. Целевая функция, на структуру которой ИМ ограничений не накладывает, используется для определения необходимости изменения параметров полученного плана. В процессе перехода от одного плана к другому изменяются значения таких параметров производства, как уровень занятости, объем сверхурочной работы, уровень запасов, объем выполнения работ по субподрядам и др., причем параметры изменяются до тех пор, пока не будет достигнут экстремум целевой функции планирования [6].

Адекватность ИМ может быть оценена с помощью критерия Стюдента [81, 82] путем проверки гипотезы о близости средних значений изучаемых выходных характеристик модели известным статистическим значениям данных характеристик при протекании реальных процессов.

Агентное моделирование является одним из направлений компьютерного моделирования [83]. Мультиагентная система (МАС) представляет собой систему, содержащую агентов, взаимодействующих друг с другом для достижения поставленных перед ними целей. Понятию агент соответствует аппаратно или программно реализованная сущность, которая способна действовать в интересах достижения целей, поставленных перед ней владельцем и/или пользователем, и которая обладает определенными интеллектуальными способностями [84].

Авдеенко Т. В. в [85] применяет мультиагентный подход для облегчения работы пользователя с базой данных при многокритериальном принятии решения; интеллектуальные агенты представляют собой модель ЛПР на каждом из этапов принятия решения о необходимости проведения выездной налоговой проверки. Агент анализа сведений осуществляет вывод рейтингов добросовестности налогоплательщиков на основе предложенного алгоритма нечеткого вывода с использованием методов анализа временных рядов (поквартальных значений выходных характеристик).

Идея коллективного поведения интеллектуальных агентов при решении задачи планирования получила свое развитие в работах Скобелева П. О. и Клейменовой Е. М. по созданию сети потребностей-возможностей (ПВ-сети) [40–43, 86]. Метод Клейменовой Е. М. предназначен для планирования работ путем построения МАС для оперативного распределения ресурсов в режиме реального времени с учетом возможности корректировки состава и характеристик планируемых проектов. ПВ-сеть применяется Клейменовой Е. М. для представления множества заказов, проектов, задач и ресурсов предприятия, при этом каждому перечисленному элементу ПВ-сети ставится в соответствие свой агент, например, агент-ресурс#1, агент-задача#1, агент-проект#1 и т.д. Агенты ПВ-сети ведут переговоры для удовлетворения своих потребностей с помощью чужих возможностей. Фрагмент протокола переговоров агентов на уровне отдельной задачи представлен на рисунке 1.5.

В случае появления при планировании новой задачи (ресурса), в системе создается новый агент-задача (агент-ресурс), который включается в переговоры, заявляя о своих потребностях и возможностях. Как видно из рисунка, из трех доступных ресурсов агент-задача

выбирает один, первый в списке, остальные альтернативные ресурсы остаются непроанализированными. Отсутствие анализа альтернатив является недостатком применения данного метода.

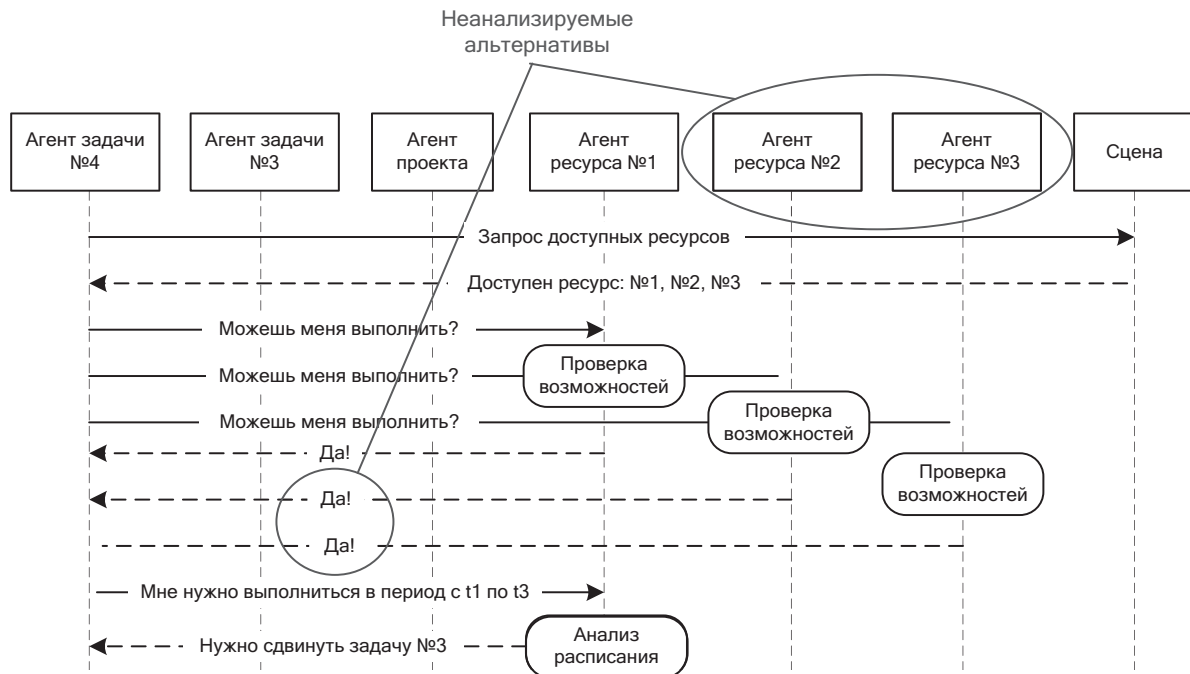


Рис. 1.5. Протокол переговоров агентов в МАС Клейменовой Е. М.

Модель реактивного агента, способного реагировать на изменения окружающей среды, реализована в модели Ресурсы-Действия-Операции (РДО) [87, 88], разработанной Курейчиком В. В. и его коллегами. Модель предназначена для описания сложных дискретных систем и протекающих в них событий. Процесс функционирования сложных систем представлен в модели РДО как временная последовательность действий и прерывающих их событий. Действия описываются операциями, которые представляют собой модифицированные продукционные правила, учитывающие временные связи: ЕСЛИ (условие) ТО1 (событие1) ЖДАТЬ (временной интервал) ТО2 (событие2). Операция, временной интервал которой равен нулю, в контексте метода РДО называется *точкой решения* и представляет собой продукционное правило. Точки решения РДО сопоставимы с реактивными агентами, хранящими в базе знаний (БЗ) ответные реакции на воздействие среды.

Гибридную архитектуру интеллектуального и реактивного агента МАС и методы имитационного, экспертного моделирования и модели-

рования систем массового обслуживания (СМО) [83, 89, 90] реализует модель мультиагентных процессов преобразования ресурсов (МППР), разработанная Аксеновым К. А. и Гончаровой Н. В. [49, 55, 157–158].

Процесс в модели МППР запускается при выполнении условий запуска, выполняется в течение заданного времени, при этом потребляет входные (складируемые) ресурсы в момент запуска, производит выходные (складируемые) ресурсы в момент окончания выполнения, захватывает нескладируемые ресурсы (средства), освобождая их по окончании выполнения. Кроме того, процесс в модели МППР захватывает заявку на время своего выполнения. Реактивный агент в модели МППР обладает БЗ, формализованной с помощью продукционной модели представления знаний, и осуществляет вывод по БЗ реакции на текущую ситуацию. Реакция агента представляет собой воздействия на процессы, ресурсы и заявки модели МППР. Интеллектуальный агент в модели МППР осуществляет поиск решения (воздействия на объекты модели МППР) по диаграмме поиска решений, представляющей собой развитие диаграммы последовательности языка UML [91, 92].

Изучаемые дискретные процессы выполнения проектных работ адекватны объектам МППР исходя из приведенных ниже особенностей.

1. Процессы выполнения дискретны во времени и запускаются событиями – приходом заказов (заявок) на выполнение.

2. Процессы захватывают на время выполнения нескладируемые ресурсы (собственные и субподрядные) и преобразуют складируемые ресурсы (материальные) путем потребления и производства складируемых ресурсов на входе и выходе процесса.

3. Между процессами выполнения отдельных проектных работ возникает конфликт на общих складируемых и нескладируемых ресурсах.

4. Процессы выполнения работ имеют иерархическую структуру, связанную с делением проектных работ на операции.

5. Процессы выполнения отдельных проектных работ обладают различным приоритетом в зависимости от стоимости работ.

6. ЛПР в ходе выполнения работ использует формализованный опыт (БЗ) для распределения ресурсов по работам.

Модель МППР и операционный анализ сетей были применены Аксеновым К. А. и Ван Каем для планирования работ портфеля проектов в строительной организации [35, 36, 54]. Планирование осуществлялось

путем построения сетевого графика проектов, расчета критического пути, разработки модели МППР выполнения операций.

В работе [80] авторами монографии сформулированы требования к модели МППР, позволяющие проводить анализ узких мест системы на общих ресурсах и средствах. Анализ позволяет с учетом резервного времени каждой операции осуществлять сдвиг узких мест с целью выравнивания использования ресурсов и средств и снижения времени выполнения проектов.

Проведем сравнительный анализ следующих моделей динамического моделирования ситуаций с точки зрения их применимости к формализации анализируемых процессов: модель Курейчика В. В. (РДО), модель Клейменовой Е. М. и Скобелева П. О., модель МППР. В качестве критериев сравнения выберем поддержку следующих методов моделирования:

1. Моделирование процессов преобразования ресурсов для отражения динамики анализируемых процессов с возможностью прерывания процессов в связи с перераспределением ресурсов на более приоритетные процессы.

2. Моделирование СМО для отражения загрузки ресурсов и очередей заявок.

3. Агентное моделирование с учетом возможности агента по прогнозированию развития ситуации в будущем, планированию своих действий на основе прогнозирования для отражения модели ЛПР, распределяющего ресурсы с учетом различных сценариев развития ситуации.

Анализ рассмотренных моделей динамического моделирования ситуаций приведен в таблице 1.12 и опубликован авторами в [112, 136].

Как следует из таблицы, полный функционал интеллектуального агента реализован только в модели МППР. Модель РДО в области моделирования процессов преобразования ресурсов схожа с моделью МППР. Недостатком данной модели является отсутствие возможности реализации интеллектуальных агентов, способных взаимодействовать друг с другом ради достижения поставленных целей. Модель Клейменовой Е. М. предоставляет функционал интеллектуального агента за исключением функции прогнозирования действий. В основе взаимодействия агентов модели лежит метод ПВ-сети, достоинством которого является децентрализация действий агентов по решению общей задачи исключения конфликтов при распределении ограниченных ресурсов. Недостатком модели Клейменовой Е. М. является отсутствие интеграции с ИМ.

Таблица 1.12

Анализ моделей динамического моделирования ситуаций

| Критерии сравнения | Модель Курейчика В. В. (РДО) | Модель Клейменовой Е. М. и Скобелева П. О. | Модель МППР |
|--|------------------------------------|--|-------------------------------------|
| Модель преобразователя ресурсов: | | | |
| - вход/выход/условия запуска/длительность | + / + /+ / + | НЕТ | + / + /+ / + |
| - иерархия процессов | НЕТ | | + |
| - прерывание процессов | НЕТ | | + |
| Модель СМО | + | НЕТ | + |
| Модель реактивного агента (форма представления знаний) | Продукции | Продукции | Продукции |
| Модель интеллектуального агента: | | | |
| - наличие у агента целей | НЕТ | + | + |
| - прогнозирование действий | | НЕТ | + |
| - анализ и планирование действий | | + | + |
| - технология реализации интеллектуального агента | | ПВ-сеть | Фреймовая ЭС |
| - язык обмена сообщениями | | Сигналы | Сигналы |
| - модель кооперации агентов | | + | + |
| Программная реализация модели | Прототип РДО-имитатор | Прототип МАС распределения ресурсов | Коммерческая реализация VRsim |

Все предъявляемые требования учитываются в модели МППР, которая объединяет в себе модель гибридного агента и модели преобразователя ресурсов и СМО. Модели преобразователя ресурсов и СМО позволяют аналитику проводить анализ исследуемой системы и изучение изменения ее параметров с течением времени под воздействием внешней среды и внутренних факторов. Модель гибридного агента позволяет разрешать задачи анализа системы в рамках прогноза различных сценариев поведения лиц, принимающих решения. При этом используется понятие «фрагмента поведения» как реакции агента на стандартные ситуации (реактивная компонента). В случае возникновения нестандартных ситуаций используется компонента, ответственная за планирование, позволяющая выстроить библиотеку планов агента и выбрать наиболее эффективный. Гибридный агент в модели МППР осуществляет гибкое планирование запасов складированных ресурсов для выполнения операций с учетом текущего запаса и времени жизни ресурсов.

В результате сравнения моделей динамического моделирования ситуаций, модель МППР была выбрана в качестве модели формализации процессов распределения ресурсов и исполнения проектных работ.

К недостаткам применения имитационных мультиагентных моделей при решении задачи планирования следует отнести необходимость формирования такого плана экспериментов с моделью, который содержал бы в себе эффективное (оптимальное) решение, что невозможно без применения методов теории экспериментов или дополнительных эвристических методов. Популярными эвристическими методами являются методы эволюционного моделирования.

1.2.4. Эволюционные методы планирования

Эволюционное моделирование (ЭМ) – известная оптимизационная методология, применяемая для решения различных задач в науке и технике [56–58, 61, 93–97]. Самым распространенным методом ЭМ являются генетические алгоритмы (ГА). Применение ГА при решении задачи планирования широко распространено в литературе [17–19, 28, 58, 60, 61, 63–69, 71, 72, 93–97]. В данных исследованиях применяются различные методы оценки функции пригодности (ФП) или целевой функции календарного плана: аналитические методы, нейронные сети, нечеткие системы [28, 60, 63–66, 68, 69, 71, 72, 93–96] и имитационное моделирование [17–19, 61, 67, 97].

Схема интеграции ГА и имитационного моделирования предложена в работах Курейчика В. В. [58, 59], Канева В. С. [17] и Осабы Е. [67]. Согласно данной схеме, альтернативные решения поставленной задачи кодируются в хромосомы, набор хромосом формирует популяцию, к популяции затем применяется ГА. ИМ используется для расчета ФП хромосом.

Одним из важнейших понятий ГА является понятие новизны, связанное с возможностью появления новых элементов (хромосом). Два типа новизны выделено в [61]: 1) *комбинаторная новизна*, при которой новые виды появляются благодаря комбинированию уже существующих; 2) *созидательная новизна*, при которой новые виды не воспроизводимы путем комбинации имеющихся видов. Вопрос о принципиальной реализуемости второго типа новизны остается открытым.

Учет в ГА комбинаторной новизны можно осуществлять с помощью алгоритма имитации отжига (АИО) [61, 62]. Управляемый параметр АИО t_q влияет на выбор хромосом текущей популяции в следующую популяцию и растет линейно с коэффициентом γ при увеличении номера популяции Q [61]:

$$t_q = t_q + \gamma \cdot t_q. \quad (1.5)$$

Несмотря на большую популярность ГА для решения различных прикладных задач, их применение сдерживается рядом причин, указанных Курейчиком В. В. [59]:

- 1) разработка ГА является уникальной ввиду привязки алгоритма к задаче на этапах кодирования ее решений в виде генов и хромосом;
- 2) разработчики отдельных ГА часто ограничиваются использованием лишь самых распространенных схем ГА.

В работах [17–18] Каневым В. С. выделена особенность ГА, связанная с комбинаторным характером оптимизационного поиска, которая приводит к слабой способности получения принципиально новых решений; сделан вывод о целесообразности интегрированного применения ГА с ИМ или методами теории планирования экспериментов. *Наличие отмеченных факторов подчеркивает актуальность создания информационной технологии, обеспечивающей применение модифицированного ГА совместно с ИМ для решения задачи планирования с поддержкой разработки пользовательских вариантов кодирования хромосом.*

1.3. Сравнительный анализ систем динамического моделирования ситуаций

Проведем обзор систем, близких по функциональности к системам динамического моделирования ситуаций (СДМС) и пригодных для решения задачи планирования работ: система имитационного моделирования (СИМ) Plant Simulation, СИМ Simio, СИМ AnyLogic и СДМС BPsim.

СИМ Plant Simulation представляет собой инструмент дискретного имитационного моделирования, который позволяет создавать модели системных процессов для определения характеристик системы и оптимизации ее производительности [99, 100].

СИМ Simio – система имитационного моделирования, поддерживающая событийное и процессное моделирование, агентное моделирование [101, 102].

СИМ AnyLogic является широко распространенной системой имитационного моделирования российского производства [44, 45]. Данная СИМ поддерживает построение трех типов моделей: непрерывных моделей системной динамики, дискретно-событийных моделей и агентных моделей.

Комплекс семейства BPsim предназначен для моделирования бизнес-процессов, принятия решений и проектирования программного обеспечения предметной области МППР. Комплекс включает в себя следующие пакеты программ [70, 103–108]: BPsim.MAS – мульти-агентная СДМС, поддерживающая графическое описание модели МППР с реактивными агентами, база знаний которых заполняется производственными правилами «Если...То»; BPsim.MSN – система технико-экономического проектирования, поддерживающая описание интеллектуальных агентов с помощью диаграмм поиска решений, являющихся развитием диаграмм последовательности языка UML [91, 109], и языка управления базами данных Transact-SQL.

Выделим следующие требования к средствам СДМС.

1. Описание динамических процессов преобразования ресурсов.
2. Поддержка аппарата систем массового обслуживания.
3. Построение мультиагентной модели.
4. Имитационное дискретно-событийное моделирование.
5. Экспертное моделирование.6.1.
6. Оптимизация моделируемых процессов.

7. Анализ результатов экспериментов.
8. Работа с базой данных модели.
9. Интегрируемость с корпоративной информационной системой (КИС).
10. Интерфейс разработки модели.

Анализ СДМС приведен в таблице 1.13 и опубликован авторами в [98].

Как следует из проведенного анализа с точки зрения возможности формализации процессов планирования работ больше всего подходят продукты семейства VPsim. К недостаткам большинства СИМ относятся:

1) отсутствие поддержки следующего функционала: а) методов экспертного моделирования, б) описание базы знаний агента; в) описание логики работы интеллектуального агента; г) формирование отчетов с рекомендациями по устранению «узких мест» модели и детального протоколирования статистики по движению экземпляров заявок; д) поддержка русского языка (за исключением Simio);

2) ориентация интерфейса системы на программиста (кроме Simio);

3) отсутствие открытого доступа к базе данных (кроме AnyLogic).

Понятийный аппарат СИМ Plant Simulation не полностью соответствует проблемной области МППР, поскольку в данной системе не поддерживается описание агентов и система ориентирована на программирующего пользователя. К достоинствам системы следует отнести поддержку интеграции системы с КИС предприятия. Понятийный аппарат СИМ Simio соответствует проблемной области МППР. К недостаткам системы следует отнести высокую стоимость и ограниченность функционала бесплатной академической версии. Понятийный аппарат СИМ AnyLogic соответствует проблемной области МППР. К недостаткам системы относятся отсутствие поддержки методов экспертного моделирования и ориентация на программирующего пользователя.

С точки зрения удобства интерфейсов описания модели процессов планирования, описания элементов МППР, ресурсов и средств (складируемых и нескладируемых ресурсов в терминологии сетевой модели), реализации технологии имитационно-эволюционного моделирования наибольшие возможности предоставляют программные продукты семейства VPsim. Данные программные продукты были выбраны для реализации разрабатываемых метода и ИТ планирования.

Сравнительный анализ СДМС

| № | Критерий сравнения | PlantSimulation | Simio | AnyLogic | BPsim |
|-----------|---|-----------------------------|----------------|-------------------------|----------------|
| 1 | Описание процессов преобразования ресурсов | | | | |
| 1.1 | - вектор входов / выходов / средств | + / + / нет | + / + / + | + / + / + | + / + / + |
| 1.2 | - количество средств: const/функция/случайная величина | + / нет / нет | + / + / + | + / + / + | + / + / + |
| 1.3 | - приоритет (относительный / абсолютный) | + / + | + / + | + / + | + / + |
| 1.4 | - задание приоритета операции: постоянная / функция | + / нет | + / + | + / + | + / + |
| 1.5 | - условие запуска процесса: функция времени / ресурсов | нет / + | + / + | + / + | + / + |
| 1.6 | - ограничения на ресурсы и средства минимум, максимум | нет / нет | + / + | нет / нет | + / + |
| 2 | Поддержка аппарата систем массового обслуживания | + | + | + | + |
| 3 | Построение мультиагентной модели | | | | |
| 3.1 | - Модели поведения (диаграммы состояний / продукции) | нет | нет / + | + / + | + / + |
| 3.2 | - База знаний агента | | нет | нет | + |
| 3.3 | - Наличие реактивного агента | | + | + | + |
| 3.4 | - Наличие интеллектуального агента | | нет | + | + |
| 4 | Имитационное дискретно-событийное моделирование | + | + | + | + |
| 5 | Экспертное моделирование | нет | нет | нет | + |
| 6 | Оптимизация моделируемых процессов | | | | |
| 6.1 | - Автоматический запуск экспериментов плана | + | + | + | нет |
| 6.2 | - Применение оптимизаторов | нет | + | + | нет |
| 7 | Протоколирование детальной статистики по заявкам | нет | нет | нет | + |
| 8 | Работа с базой данных модели | | | | |
| 8.1 | - Импорт/экспорт исходных данных из внешних источников | + | + | + | + |
| 8.2 | - Открытый доступ к базе модели | нет | нет | + | + |
| 9 | Интегрируемость СИМ с КИС предприятия | | | | |
| 9.1 | - Поддержка языка программирования | SimTalk | C# | Java | Transact-SQL |
| 9.2 | - Встроенные программные помощники | нет | нет | + | + |
| 10 | Интерфейс программиста / специалиста-предметника | + / нет | нет / + | + / нет | нет / + |

1.4. Анализ применимости методов теории планирования экспериментов

Согласно теории планирования экспериментов [83, 110] основная цель эксперимента – изучить влияние управляемых переменных (факторов) на выходную переменную (отклик). Каждый фактор может принимать в эксперименте одно из нескольких значений (уровней) в пределах допустимой области. Для задачи планирования портфеля проектов в качестве факторов выступают даты начала выполнения каждой из операций портфеля. Самым распространенным экспериментом с машинной моделью системы является полный факторный эксперимент (ПФЭ), в котором реализуются все возможные сочетания уровней факторов. О важности применения методов теории планирования экспериментов применительно к имитационному моделированию при решении задачи оптимизации сложных ОС говорится в работах [18, 19].

Рассмотрим применение ПФЭ для решения задачи планирования проектных работ ЗАО «Телесистемы» с помощью мультиагентной имитационной модели. Выберем такую аппроксимирующую модель, которая включает в себя только линейные члены полинома и их произведения. Для оценки коэффициентов данной модели используется план ПФЭ с варьированием k факторов на двух уровнях (верхней и нижней границах допустимой области значений факторов). Общее число экспериментов с мультиагентной имитационной моделью составит в данном случае $N_{\text{эксп}}=2^k$. Для ЗАО «Телесистемы» рассматривается портфель проектов, включающий 35 операций, следовательно, число факторов $k=35$. Таким образом, число экспериментов с мультиагентной имитационной моделью для рассматриваемой задачи при проведении ПФЭ составит $2^{35} \approx 34 \cdot 10^9$, что свидетельствует о ресурсоемкости данного метода планирования эксперимента.

Рассмотрим применение для решения задачи планирования проектных работ ЗАО «Телесистемы» дробного факторного эксперимента (ДФЭ), который позволяет сократить число экспериментов ПФЭ с машинной моделью за счет пренебрежения незначимыми взаимодействиями факторов. Рассмотрим шаги применения ДФЭ для решения поставленной задачи.

Первым шагом применения ДФЭ является выбор дробной реплики. Для сохранения у матрицы планирования ДФЭ свойств матрицы планирования ПФЭ 2^k (симметричности, ортогональности и нормировки) следует применять дробную реплику 2^{k-p} при выполнении следующего условия [110]:

$$k+1 \leq 2^{k-p}, \quad (1.6)$$

где k – число оцениваемых факторов, $k-p$ – число основных факторов, уровни которых определяются матрицей ПФЭ размера 2^{k-p} , p – число дополнительных факторов, уровни которых определяются с помощью генераторов плана (для каждого дополнительного фактора свой генератор).

Для задачи «Телесистем» можно выделить 35 факторов, соответствующих датам начала выполнения операций. Если рассматривать выполнение операций отдельными отделами, то можно уменьшить число факторов; максимальное число факторов тогда будет 23 (23 операции, выполняемые производственным отделом). Тогда согласно (1.6) необходимо рассматривать следующие соотношения: $24 \leq 2^5 = 32$, $24 \leq 2^6 = 64$, $24 \leq 2^7 = 128$ и т.д. Примем в силу ограниченности машинного ресурса на проведение имитационного эксперимента максимальное число экспериментов равным $2^7 = 128$. Тогда план ДФЭ для рассматриваемой задачи будет содержать 2^{23-16} экспериментов, среди которых 7 основных факторов варьируются на двух уровнях верхней и нижней границ допустимого диапазона, и 16 дополнительных факторов определяются согласно генераторам плана.

В отсутствии знаний о значимости или незначимости взаимодействий между основными факторами необходимо принять решение о выборе генераторов плана. В качестве генератора плана для отдельного дополнительного фактора могут выступать парные, тройные, четверные и т.д. произведения основных факторов. Целесообразно в качестве генератора плана дополнительного фактора выбирать произведение как можно большего числа основных факторов для повышения разрешающей способности плана.

Оценим число вариантов Q выбора p генераторов плана из двойных, тройных и т.д. произведений $k-p$ основных факторов. Оценку проведем для наименьшего числа основных факторов, поскольку

при росте числа основных факторов число вариантов Q выбора генераторов плана будет расти. Примем, что при выборе дробной реплики было выделено $p=18$ дополнительных факторов и $k-p=23-18=5$ основных факторов (наименьшее число основных факторов согласно формуле (1.6) для решаемой задачи). Тогда для первого дополнительного фактора существует Q_1 вариантов выбора генератора плана: $Q_1 = 1 + C_5^4 + C_5^3 + C_5^2 = 1 + 5 + 10 + 10 = 26$. Для второго дополнительного фактора при условии осуществленного выбора генератора плана для первого фактора число вариантов будет уже $Q_2 = Q_1 - 1 = 25$, а для 18-го дополнительного фактора число вариантов выбора генератора плана будет $Q_{18} = Q_1 - 17 = 9$. Оценим число вариантов Q выбрать 18 генераторов плана из двойных, тройных и четверных произведений 5-ти основных факторов: $Q = 26 * 25 * \dots * 9 \approx 10^{22}$.

Таким образом, можно заключить, что выбор дробной реплики и генераторов плана при проведении ДФЭ требует знания значительной априорной информации о значимости и незначимости взаимодействий основных факторов с целью замены незначимых взаимодействий основных факторов дополнительными факторами.

Кроме того, при рассмотрении предметной области процессов выполнения работ по портфелю проектов для ЗАО «Телесистемы» можно говорить об одновременном выполнении более 10-ти операций (см. рисунок 1.6). Одновременное выполнение операций напрямую влияет на формирование отклика – объема (а значит и стоимости) привлекаемых субподрядных ресурсов. Следовательно, для рассматриваемой предметной области нельзя пренебрегать взаимодействиями факторов ниже 10-го порядка, но тогда необходимо рассматривать 10 (и более) основных факторов, а значит строить матрицу планирования ДФЭ размером 2^{10} , уже содержащую 1024 эксперимента, что ресурсоемко в плане затрат машинного времени.

Таким образом, применение методов теории планирования экспериментов (ПФЭ и ДФЭ) к решаемой задаче планирования выполнения 35 операций ЗАО «Телесистемы» является ресурсоемким с точки зрения использования машинного ресурса при проведении компьютерного моделирования. Актуальной является задача сужения пространства поиска решения с помощью применения эвристического подхода, в частности, эволюционного моделирования.

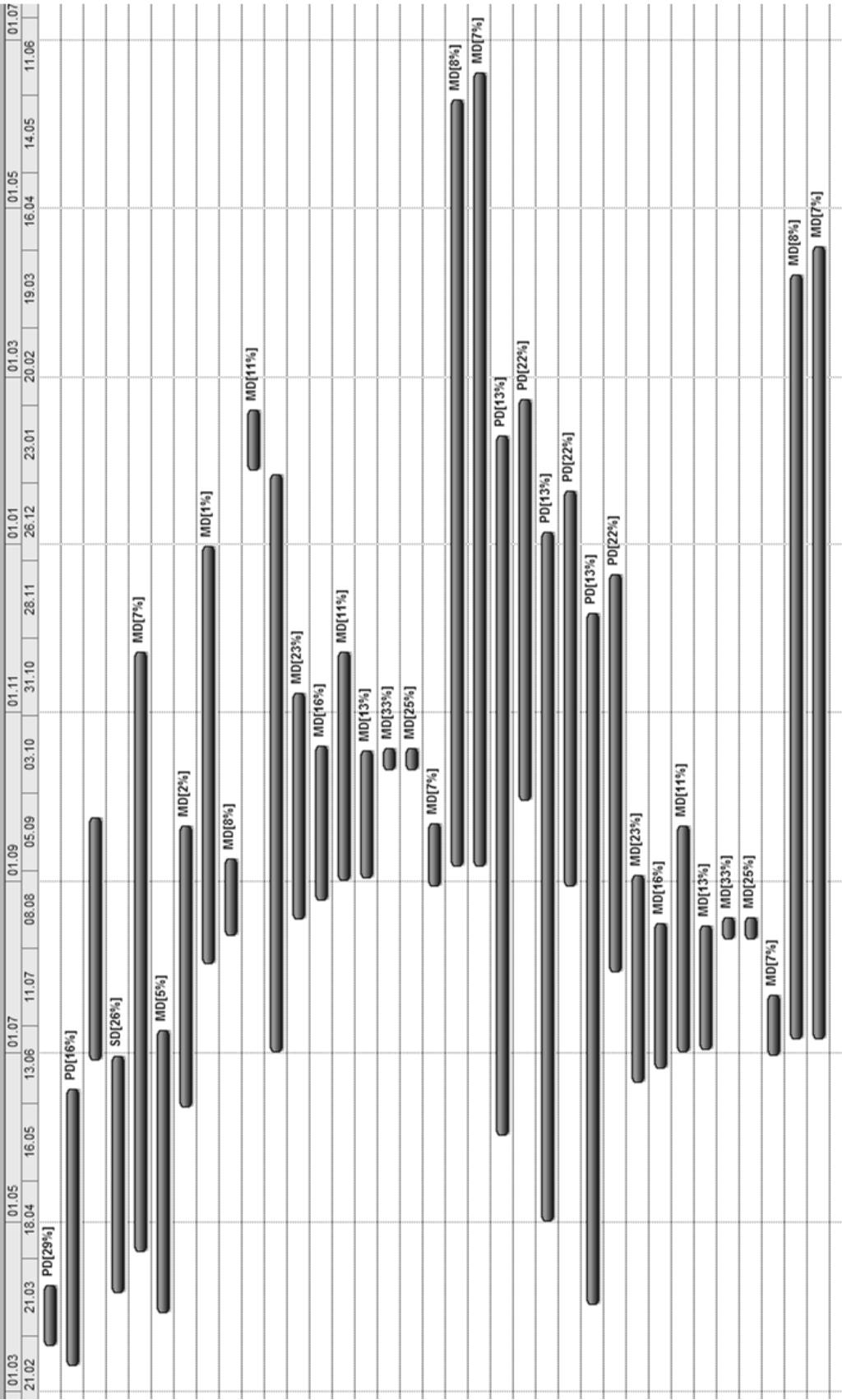


Рис. 1.6. Диаграмма Ганта для начального календарного плана работ

1.5. Выводы

Проблема исследования и разработки методов и средств планирования работ с привлечением субподрядных ресурсов с наименьшими затратами в настоящее время находится в стадии развития. Об актуальности исследования, разработки и внедрения методов планирования, осуществляющих поиск расписания за приемлемое время с учетом рассматриваемой целевой функции и заданных ограничений, говорится в работах Гимади Э. Х., Гончарова Е. Н., Канева В. С., Кочетова Ю. А., Мезенцева Ю. А., Моудера Дж., Норенкова И. П., Прилуцкого М. Х., Севастьянова С. В., Pinedo M., Pritsker A. и др.

Рассматриваемая задача планирования обладает следующими особенностями: поиск решения, оптимального по затратам на привлечение субподрядных нескладируемых ресурсов, большая размерность пространства поиска, наличие временных ограничений, учет ограниченных складируемых и нескладируемых ресурсов (с учетом времени жизни складируемых ресурсов). Указанные особенности сдерживают применение классических методов, таких как методы теории расписаний и метод критического пути. Данные методы решают задачу планирования с учетом минимизации времени расписания, что влечет за собой плотную упаковку работ с соблюдением всех ограничений; вопросам привлечения и оптимизации стоимости субподрядных ресурсов не уделено должного внимания. Применение для решения задачи гибридного метода, интегрирующего имитационное мультиагентное и эволюционное моделирование, позволяет учесть выделенные особенности решаемой задачи.

В рамках разрабатываемого нового гибридного метода имитационная модель предназначена для оценки характеристик функционирования процессов во времени; мультиагентная модель предназначена для решения задачи построения моделей ЛПР, формализующих опыт распределения ресурсов по процессам; эволюционная модель предназначена для проведения оптимизационного эксперимента, сужающего пространство поиска.

Требуют дальнейшего исследования такие вопросы как:

1. Разработка для субподрядного планирования с временными ограничениями эвристико-имитационного метода на основе имитационного мультиагентного моделирования и эвристических

правил смещения сроков начала работ, а также метода мультиагентной генетической оптимизации на основе интеграции имитационного мультиагентного и эволюционного моделирования.

2. Реализация проблемно-ориентированных инструментальных средств моделирования и генетической оптимизации в области процессов преобразования ресурсов, поддерживающих решение задачи субподрядного планирования с временными ограничениями.

2. МЕТОД МУЛЬТИАГЕНТНОЙ ГЕНЕТИЧЕСКОЙ ОПТИМИЗАЦИИ (МГО) ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ ПЛАНИРОВАНИЯ

2.1. Постановка задачи календарного планирования проектных работ

Рассмотрим задачу планирования проектов, связанную с определением календарного плана работ. Все операции проектов должны быть выполнены с учетом временных ограничений, которые определяются путем переговоров с заказчиками. В случае занятости собственных трудовых ресурсов необходимо привлекать субподрядные ресурсы для выполнения всех операций в срок. Для рассматриваемой задачи планирования работ сделаны следующие допущения:

1. Отдельный проект состоит из ряда операций с известными временами обработки, датами раннего и позднего начала, трудозатратами и стоимостью.

2. Выполнение операций требует наличие нескладируемых трудовых ресурсов (собственных или субподрядных); для отдельных операций задано требование по наличию складированных ресурсов на момент начала выполнения операции и/или объем производимых ресурсов на момент окончания выполнения.

3. Субподрядные ресурсы могут быть использованы для выполнения части операции.

4. В случае освобождения собственных ресурсов субподрядные работы могут быть прерваны и переданы для выполнения собственными ресурсами.

5. Субподрядные ресурсы доступны каждый день в неограниченном количестве (например, при работе с несколькими субподрядчиками).

Рассмотрим постановку задачи планирования работ, опубликованную авторами в [111]. Пусть портфель проектов состоит из P проектов, $p = 1, \dots, P$; N_p – количество операций проекта p с индексом $i = 1, 2, \dots, N_p$; R – количество нескладируемых ресурсов (отделов) выделенной компетенции, $r = 1, \dots, R$; R^* – количество складированных ресурсов выделенного типа, $r^* = 1, \dots, R^*$. Обозначим множе-

ство операций проекта p : $Pr_p = \{Op_i\}_{i=1, \dots, N_p}$. Пусть заданы времена начала и окончания составления расписания t_0 и T ; для каждого нескладируемого ресурса r задано доступное количество Q_r ; для каждого складируемого ресурса r^* задано начальное количество Q_{t_0, r^*} . Пусть для каждой операции i проекта p определены следующие характеристики: время выполнения $d_{p,i} \geq 0$; требуемое количество нескладируемых ресурсов выделенной компетенции $q_{p,i,r} \geq 0$; потребляемое в момент начала операции и производимое в момент окончания операции количество складируемых ресурсов заданного типа $q_{p,i,r^*}^- \leq 0$ и $q_{p,i,r^*}^+ \geq 0$ соответственно; стоимость одного дня выполнения операции единичным количеством нескладируемого ресурса выделенной компетенции $s_{p,i,r} \geq 0$; раннее и позднее времена начала операции $\tau_{p,i}^0 \geq 0$ и $\tau_{p,i}^1 \geq 0$, которые задают ограничения на время начала операции $x_{p,i}$. Без ограничения общности будем считать, что набор операций для каждого проекта p упорядочен по возрастанию стоимости $s_{p,i,r}$.

Требуется найти расписание портфеля проектов, задаваемое временами старта операций $p = 1, 2, \dots, P, i = 1, 2, \dots, N_p, x_{p,i} \in \mathbb{Z}^+, \mathbb{Z}^+ = \{0, 1, 2, \dots\}$.

Обозначим множество индексов операций, выполняемых в момент времени $t \geq t_0$ и использующих нескладируемый ресурс r следующим образом:

$$I(t, r) = \{i = 1, \dots, m \mid x_{p,i} \leq t < x_{p,i} + d_{p,i} \text{ \& } q_{p,i,r} \neq 0 \text{ \& } Op_i \in Pr_p \text{ \& } p \in [1, P]\}.$$

В каждый момент времени t для каждого из нескладируемых ресурсов компетенции r возможны следующие ситуации:

1) $\sum_{p \in [1, P]} \sum_{i \in I(t, r)} q_{p,i,r} \leq Q_r$ – в случае выполнения в момент времени t всех операций с индексом $i \in I(t, r)$ собственным ресурсом компетенции r ;

2) $\sum_{p \in [1, P]} \sum_{i \in I(t, r)} q_{p,i,r} > Q_r$ – в случае привлечения в момент времени t дополнительного (субподрядного) количества ресурса компетенции r для выполнения операций с индексом $i \in I(t, r)$.

Обозначим множество индексов операций, выполняемых в момент $t \geq t_0$ и использующих собственный ресурс r в пределах доступного количества Q_r :

$$I^{\sim}(t, r) = \{i = 1, \dots, m^{\sim} \mid i \in I(t, r) \text{ \& } \sum_{p \in [1, P]} \sum_i q_{p,i,r} \leq Q_r\}. \quad (2.1)$$

Тогда множество индексов операций, выполняемых в момент времени $t \geq t_0$ и использующих субподрядный ресурс r , определим так:

$$I^*(t, r) = I(t, r) \setminus I^{\sim}(t, r) = \{i = 1, \dots, m^* \mid i \in I(t, r) \text{ \& } i \notin I^{\sim}(t, r)\}. \quad (2.2)$$

Простой в процентах собственных ресурсов компетенции r при выполнении проекта p в момент времени t будем рассчитывать по формуле:

$$Z_{p,t,r} = \begin{cases} (1 - \sum_{i \in I^{\sim}(t,r)} q_{p,i,r} / Q_r) \cdot 100\%, & i \in I^{\sim}(t, r) \text{ \& } Op_i \in Pr_p, \\ 0\%, & i \in I^*(t, r) \text{ \& } Op_i \in Pr_p. \end{cases} \quad (2.3)$$

Загруженность в процентах отдела r , выполняющего проект p в момент времени t , определим следующим образом:

$$U_{p,t,r} = 100\% - Z_{p,t,r}.$$

Стоимость привлекаемого субподряда компетенции r для выполнения проекта p в момент времени t будем рассчитывать по формуле:

$$SC_{p,t,r} = \sum_{i \in I^*(t,r)} s_{p,i,r} q_{p,i,r}. \quad (2.4)$$

Текущий объем складированного ресурса r^* в момент t определим как:

$$Q_{t,r^*} = Q_{t_0,r^*} + \sum_{t'=t_0}^t \sum_{p=1}^P \sum_{\substack{i \in I(t', r^*) \\ \wedge (t' = x_{p,i})}} q_{p,i,r^*}^- + \sum_{t'=t_0}^t \sum_{p=1}^P \sum_{\substack{i \in I(t', r^*) \\ \wedge (t' = x_{p,i} + d_{p,i})}} q_{p,i,r^*}^+. \quad (2.5)$$

Формализуем задачу планирования проектных работ:

$$\sum_{p=1}^P \sum_{t=t_0}^T \sum_{r=1}^R SC_{p,t,r} \rightarrow \min. \quad (2.6)$$

$$\sum_{p=1}^P \sum_{\substack{i \in I(t, r^*) \\ \wedge (t = x_{p,i})}} |q_{p,i,r^*}^-| \leq Q_{t,r^*}, t = t_0, \dots, T, r^* = 1, \dots, R^*. \quad (2.7)$$

$$\tau_{p,i}^0 \leq x_{p,i} \leq \tau_{p,i}^1, p = 1, \dots, P, i = 1, \dots, N_p, x_{p,i} \in \mathbb{Z}^+. \quad (2.8)$$

Целевая функция (2.6) минимизирует суммарную стоимость привлекаемых субподрядных ресурсов в случае превышения доступности собственных нескладируемых ресурсов. Ограничение (2.7) обеспечивает наличие складированных ресурсов на момент начала выполнения каждой из операций, требующих использования складированных ресурсов. Ограничение (2.8) накладывает временные рамки на даты начала выполнения операций.

2.2. Разработка эвристико-имитационного метода планирования работ

Существует несколько вариантов реализации в имитационной модели распределения нескладируемых ресурсов (в дальнейшем просто ресурсов), собственных и субподрядных, по проектам портфеля, отличающихся по достоверности получаемых результатов и простоте программной реализации в имитационной модели. Рассмотрим описание этих вариантов на примере портфеля проектов, состоящего из двух проектов: P_1 и P_2 . Входная информация по проектам представлена на рисунке 2.1 в виде диаграммы Ганта (верхний график): по проекту P_1 длительность 2 дня, трудозатраты 16 человеко-дней (в среднем 8 человек в день); по проекту P_2 длительность 3 дня, трудозатраты 6 человеко-дней (в среднем 2 человека в день).

Рассмотрим для данного примера отдел исполнения проектов, состоящий из 8 человек. Тогда при условии наложения сроков выполнения проектов возникает превышение доступности трудовых ресурсов на предприятии (2-ой день по диаграмме Ганта). Опишем варианты распределения ресурсов с помощью графика собственных свободных ресурсов (количества свободных человек) с отражением объема привлекаемого в день субподряда (см. рисунок 2.1, нижний график).

Вариант I: перераспределение ресурсов при начале очередного проекта (этапа проекта) без компенсации возникающего субподряда.

В данном варианте анализ количества свободных ресурсов и их распределение по работам происходит в начале каждой работы (проекта, этапа проекта, операции). При использовании варианта I в примере на рисунке 2.1 возникает самый большой объем субподряда – 6 человеко-дней, т.е. весь проект P_2 отдается на субподряд, несмотря на то что на третий день освобождаются собственные ресурсы. Данный вариант наиболее прост в реализации и наименее достоверен по получаемой загрузке и объему субподряда.

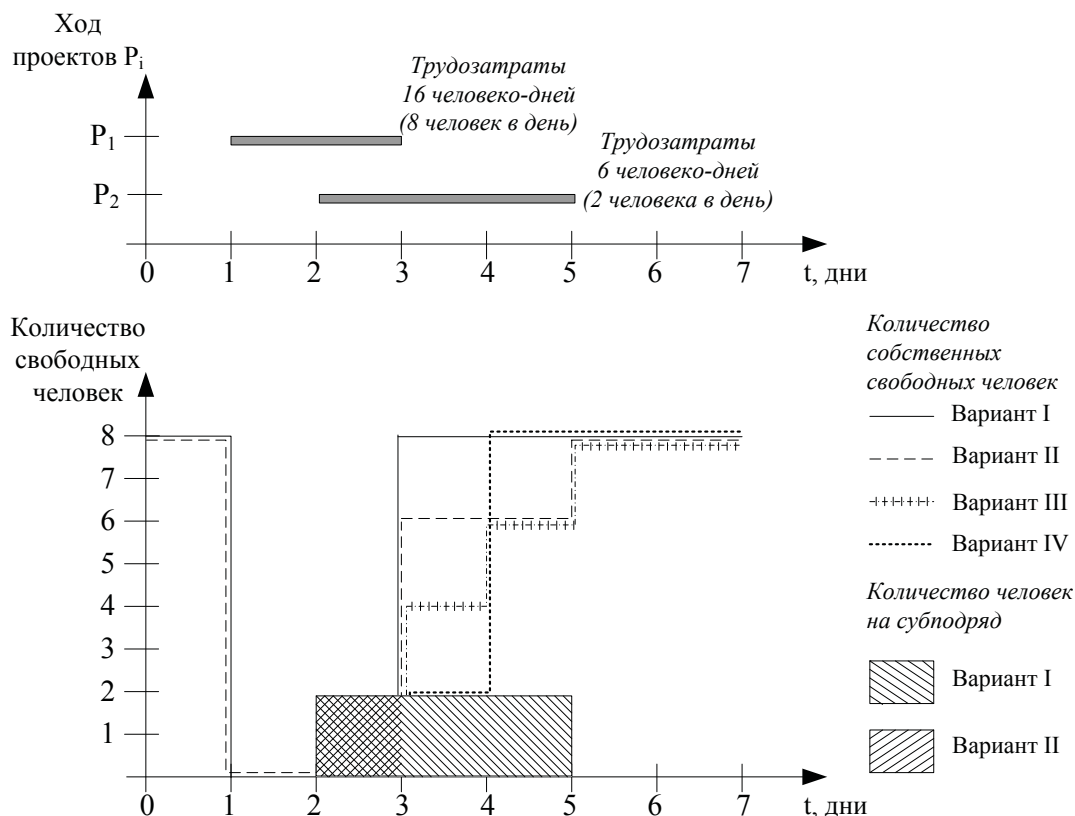


Рис. 2.1. Варианты распределения ресурсов по проектам

Вариант II: перераспределение ресурсов каждый день без компенсации субподряда.

В данном варианте анализ количества свободных ресурсов и их распределение по работам происходит каждый день. При использовании данного варианта субподряд возникает на второй день в размере 2 человеко-дней (чд). На третий день освобождаются собственные ресурсы, которые и используются для выполнения проекта P_2 (третий и четвертый дни).

Вариант III: перераспределение ресурсов каждый день с компенсацией субподряда.

Компенсация возникающего при реализации варианта II субподряда заключается в перераспределении трудозатрат, отнесенных на субподряд, на собственные свободные ресурсы при наличии таковых в следующий день за днем возникновения субподряда. В рассматриваемом примере на рисунке 2.1 при использовании варианта III субподряд объемом 2 чд компенсируется на третий день с использованием собственных ресурсов, при этом на второй день субподряда не возникает.

Вариант IV: перераспределение ресурсов каждый день с работой на опережение и компенсацией субподряда.

Работа на опережение заключается в максимальном использовании каждый день имеющихся свободных ресурсов на выполнение начатых работ (проектов, этапов проекта, операций). В рассматриваемом примере на рисунке 2.1 субподряд компенсируется как в варианте III на третий день, и в этот же день за счет имеющихся ресурсов отдела досрочно завершается проект P_2 . В результате на четвертый день все ресурсы отдела освобождаются и их можно использовать при планировании следующих работ.

Сравним рассмотренные варианты распределения ресурсов за период с 1 по 5 день (см. таблицу 2.1).

Т а б л и ц а 2 . 1

Оценка выходных характеристик исполнения операций (5 дней)

| Вариант | Загрузка ресурсов отдела, % | Объем субподряда, чд | День освобождения ресурсов отдела от работ |
|---------|-----------------------------|----------------------|--|
| I | 50,00 | 6 | 3 |
| II | 62,50 | 2 | 5 |
| III | 68,75 | 0 | 5 |
| IV | 68,75 | 0 | 4 |

Как следует из таблицы, наиболее эффективными по общей загрузке ресурсов предприятия и объему субподряда оказываются варианты III и IV. Тем не менее, данные варианты по сравнению с вариантами I и II обладают существенно большей сложностью реализации в модели МППР, поскольку используемый в них механизм компенсации субподряда требует разработки методов прогнозирования изменения объема свободных ресурсов предприятия.

Использованию модели с распределением ресурсов на основе варианта IV эквивалентно использование модели с распределением ресурсов по варианту II в контуре обратной связи на основе технологии интеллектуальных агентов. Данная технология легла в основу разработанного интеллектуального агента (ИА) планирования, описанного авторами в работе [113]. На рисунке 2.2 в графической нотации IDEF0 представлен контур поиска эффективного решения планирования работ эвристико-имитационным (ЭИ) методом с помощью ИА планирования.

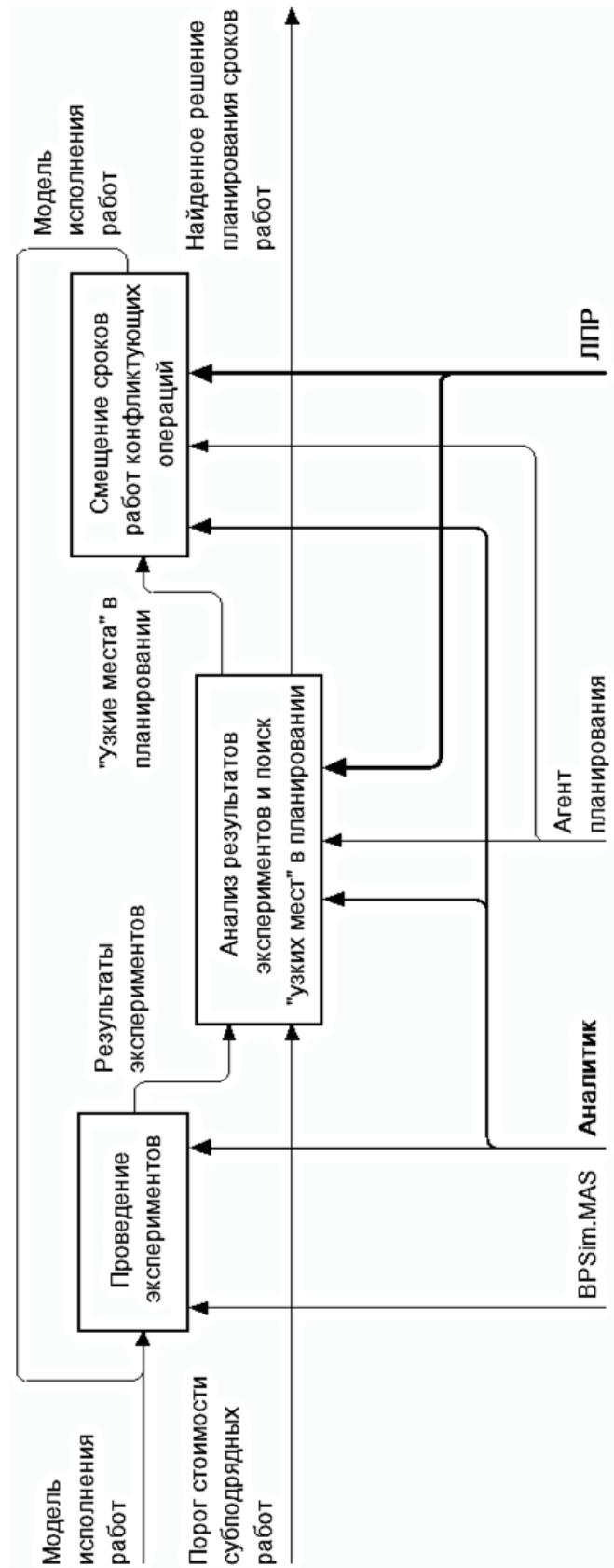


Рис. 2.2. Контур поиска решения с помощью ЭИ метода и ИА планирования

ЭИ метод включает в себя выполнение следующих шагов:

1) анализ результатов моделирования распределения ресурсов по варианту II – стоимости субподрядных работ по каждой операции всех проектов портфеля и загрузки собственных отделов;

2) поиск «узких мест» модели, связанных с операциями, требующими высоких по оценке экспертов затрат на субподряд;

3) смещение начал выполнения выявленных операций в модели на сроки, определяемые алгоритмом работы ИА планирования;

4) предоставление возможности корректировки полученных сроков ЛПР;

5) передача по обратной связи скорректированной модели на этап проведения экспериментов, по результатам которых аналитик и ЛПР оценивают эффективность принятых решений.

Агент планирования в предложенном на рисунке 2.2 контуре поиска решения представляет собой прибор обслуживания заявок с базой знаний, наполненной продукционными правилами вида «Если...То». Пусть агент A_i содержит K_{A_i} правил базы знаний, тогда возможен переход от агентной модели к ИМ «без агентов», в которой агент A_i заменен K_{A_i} операциями, при этом каждая операция выполняет одно правило базы знаний агента. Очевидно, что чем больше число правил агента и/или число агентов в агентной модели, тем сильнее разрастается структура модели при переходе к модели «без агентов».

При обработке блоков модели с нулевым временем выполнения в процессно-ориентированных системах имитационного моделирования [114, 115] (такие блоки используются для проверки условий и представляют собой точки решений) дополнительно вводится свойство «выжигается», чтобы не допускать заикливания алгоритма моделирования. Свойство «выжигается» позволяет один раз на текущем такте выполнить такой блок. Альтернативной стратегией является запрет указания нулевой длительности в соответствующих блоках.

Рассмотрим решение задачи распределения ресурсов, приведенной на рисунке 2.1 (распределение субподряда по типу II) с помощью СИМ BPsim.MAS.

Построим две модели: имитационную модель, в которой нулевое время выполнения продукционных правил распределения ресурсов будем задавать с использованием свойства «выжигается», и агентную модель, в которой правила распределения ресурсов будем описывать с помощью БЗ агентов.

В таблице 2.2 приведен сравнительный анализ структуры и выходных характеристик моделей.

Таблица 2.2

Анализ имитационной и агентной моделей (два проекта)

| Имитационная модель | Агентная модель |
|---|---|
| <p>Распределение субподряда без агентов</p> | <p>Распределение субподряда с агентами</p> |
| Число узлов модели 20, из них операций 20 | Число узлов модели 9, из них операций 4 |
| | |
| Время освобождения собственных ресурсов: 6-ой день | Время освобождения собственных ресурсов: 5-ый день |
| | |
| Суммарный объем субподряда 2 человеко-дня | Суммарный объем субподряда 2 человеко-дня |

Согласно данным таблицы 2.2 значения выходных параметров агентной модели – суммарный объем привлекаемого субподряда и время освобождения собственных ресурсов – совпадают с расчетными значениями решаемой задачи (см. рисунок 2.1 вариант II: объем субподряда 2 человека-дня, ресурсы освобождаются на 5 день). Для имитационной модели наблюдается задержка времени освобождения собственных ресурсов по сравнению с расчетным временем (6-ой день против 5-ого дня соответственно). Данное обстоятельство связано с возникновением задержки при распределении субподрядных работ с помощью нескольких операций с нулевым временем выполнения.

Рассмотрим случай, при котором к решаемой задаче добавляется еще один проект как показано на рисунке 2.3.

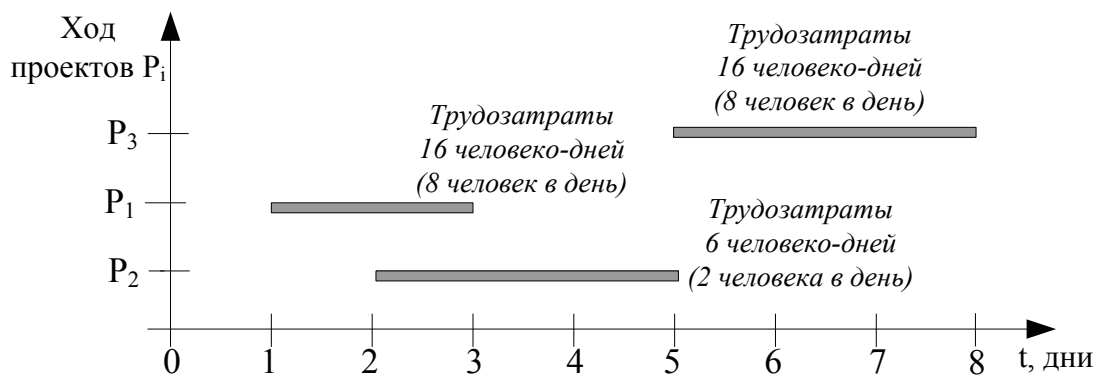


Рис. 2.3. Задача распределения ресурсов с тремя проектами

Согласно расчетным значениям для задачи, приведенной на рисунке 2.1, можно заключить, что расчетные значения для задачи, приведенной на рисунке 2.3, будут следующими: суммарный объем привлекаемого субподряда сохранится, время освобождения собственных ресурсов будет равным $5+3=8$ -ой день, поскольку к пятому дню собственные ресурсы освободятся, и их будет достаточно для выполнения третьего проекта длительностью три дня. В таблице 2.3 приведен сравнительный анализ структуры и выходных характеристик имитационной и агентной моделей для задачи на рисунке 2.3.

Как следует из таблицы 2.3, значения выходных параметров агентной модели совпадают с расчетными значениями решаемой задачи по распределению ресурсов между тремя проектами, в то время как

значения выходных параметров имитационной модели превышают расчетные значения (суммарный объем субподряда 4 человеко-дня против 2 человеко-дней, время освобождения собственных ресурсов 10-ый день против 8-ого дня).

Таблица 2.3

Анализ имитационной и агентной моделей (три проекта)

| Имитационная модель | Агентная модель |
|--|---|
| <p>Распределение субподряда без агентов</p> | <p>Распределение субподряда с агентами</p> |
| Число узлов модели 29, из них операций 29 | Число узлов модели 12, из них операций 5 |
| <p>Число свободных собственных ресурсов</p> | <p>Число свободных собственных ресурсов</p> |
| Время освобождения собственных ресурсов: 10-ый день | Время освобождения собственных ресурсов: 8-ой день |
| <p>Объем привлекаемого субподряда человекодни</p> | <p>Объем привлекаемого субподряда</p> |
| Суммарный объем субподряда: 4 человеко-дня | Суммарный объем субподряда: 2 человеко-дня |

В результате проведенного сравнения был сделан следующий вывод. **Дополнительное привлечение субподряда в ИМ без агентов (по сравнению с агентной моделью) является следствием накапливаемой ошибки, связанной со временем освобождения собственных ресурсов.**

Таким образом, был сделан вывод о предпочтении мультиагентной модели при разработке алгоритма распределения собственных и субподрядных ресурсов по операциям.

С помощью модели МППР формализуем процессы выполнения проектных работ с учетом потребления и производства складированных ресурсов и использования нескладированных (трудовых) ресурсов (собственных и субподрядных, объединенных по компетенции в отделы). Агент в модели МППР представляет собой модель ЛПР (менеджера проекта), знания которого относительно распределения ресурсов формализуются с помощью продукционных правил. Также модель МППР включает агента материально-технического обеспечения, который контролирует текущий объем и время жизни складированных ресурсов и следит за выполнением ограничения (2.7) путем формирования заявок на производство (закупку) необходимого количества складированного ресурса в случае снижения его текущего объема до критического значения или превышения времени жизни ресурса.

Рассмотрим алгоритм интеллектуального агента планирования (ИАП), разработанный на основе модели МППР и опубликованный авторами в [116, 117]. Пусть n – итерационный шаг, $n \in \mathbb{N}$.

$M_{p,i,r}(n) = [a; b]$ – временной интервал с длительностью $c_{p,i,r} = b - a$, на котором загруженность отдела r , выполняющего операцию i , $U_{p,i,r}^0(n) = 100\%$;

$M_{p,i,r}^-(n) = [(a - (n + 1) \cdot c_{p,i,r}); (a - n \cdot c_{p,i,r})]$ – временной интервал $M_{p,i,r}(n)$, смещенный на $(n + 1) \cdot c_{p,i,r}$ дней влево по оси времени и удовлетворяющий условию: $U_{p,i,r}^-(n) \neq U_{p,i,r}^0(n)$;

$U_{p,i,r}^-(n)$ – средняя загруженность отдела r , выполняющего операцию i проекта p на временном интервале $M_{p,i,r}^-(n)$, которая определяется по формуле:

$$U_{p,i,r}^-(n) = \sum_{t=a-(n+1) \cdot c_{p,i,r}}^{a-n \cdot c_{p,i,r}} U_{p,t,r} / c_{p,i,r} \quad (2.9)$$

$M_{p,i,r}^+(n) = [(b + n \cdot c_{p,i,r}); (b + (n + 1) \cdot c_{p,i,r})]$ – временной интервал $M_{p,i,r}(n)$, смещенный на $(n + 1) \cdot c_{p,i,r}$ дней вправо по оси времени и удовлетворяющий условию: $U_{p,i,r}^+(n) \neq U_{p,i,r}^0(n)$;

$U_{p,i,r}^+(n)$ – средняя загруженность отдела r , выполняющего операцию i проекта p на временном интервале $M_{p,i,r}^+(n)$, которая определяется по формуле:

$$U_{p,i,r}^+(n) = \sum_{t=b+n \cdot c_{p,i,r}}^{b+(n+1) \cdot c_{p,i,r}} U_{p,t,r} / c_{p,i,r}. \quad (2.10)$$

Алгоритм интеллектуального планирования включает в себя шаги:

1. Проведение эксперимента с моделью МППР, на вход которой подаются даты начала операций $x_{p,i}$. Формирование значений выходных параметров модели МППР: для каждого момента t каждого проекта p определение множества операций $Op_i \in Pr_p$ с индексами $i \in I^*(t, r)$, выполняемых в момент t и использующих субподрядный ресурс r , для каждой операции формирование затрат на субподряд $s'_{p,i,r} = s_{p,i,r} q_{p,i,r}$; для каждого отдела r формирование загруженности отдела $U_{p,t,r}$ по выполнению проекта p ; для каждого складированного ресурса r^* формирование функции зависимости текущего объема Q_{t,r^*} от времени. Задание $p = 1$.

2. Определение для проекта p операций с индексом $i = 1, \dots, N'$, $N' \leq N_p$, для которых затраты на субподряд $s'_{p,i,r}$ превышают заданный порог $\Theta_{p,i,r}$. Если $N' \neq 0$, то задание $i = 1, n = 1$ и переход на п.3, иначе переход на п.6.

3. Определение компетенции r ресурса, выполняющего операцию i проекта p . Выделение для операции временного отрезка $[x_{p,i}; x_{p,i} + d_{p,i}]$ с длиной $c_{p,i,r}$.

4. Если существует отрезок $M_{p,i,r}(n) \subset L_{p,i}$, то переход на п.7, иначе на п.5.

5. Если $(i + 1) < N'$, то задание $i = i + 1$ и переход на п.3, иначе на п.6.

6. Если $(p + 1) < P$, то задание $p = p + 1$ и переход на п.2, иначе на п.14.

7. Расчет загруженностей $U_{p,i,r}^-(n)$ и $U_{p,i,r}^+(n)$ для отрезков $M_{p,i,r}^-(n)$ и $M_{p,i,r}^+(n)$.

8. Если $U_{p,i,r}^-(n) < U_{p,i,r}^+(n)$, то переход на п.9, иначе переход на п.10.

9. Если $\tau_{p,i}^0 \leq (x_{p,i} - c_{p,i,r} \cdot (n + 1))$ (проверка ограничения (2.8)), то смещение начала выполнения ресурсом r операции i проекта p :

$x_{p,i} = x_{p,i} - c_{p,i,r} \cdot (n + 1)$ и переход на п.1, иначе переход на п.5.

10. Если $U_{p,i,r}^-(n) > U_{p,i,r}^+(n)$, то переход на п.11, иначе переход на п.12.

11. Если $(x_{p,i} + c_{p,i,r} \cdot (n + 1)) \leq \tau_{p,i}^1$, то смещение начала выполнения ресурсом r операции i проекта p : $x_{p,i} = x_{p,i} + c_{p,i,r} \cdot (n + 1)$ и переход на п.1, иначе на п.5.

12. Если $U_{p,i,r}^-(n) = U_{p,i,r}^+(n)$ и $U_{p,i,r}^-(n) \neq U_{p,i,r}^0(n)$, то переход на п.9, иначе переход на п.13.

13. Задание $n = n + 1$ и переход на п.7.

14. Конец.

Определим максимально возможное число итераций поиска решения с помощью алгоритма интеллектуального планирования. Параметром алгоритма является n – число шагов поиска. За каждый шаг алгоритм обходит последовательно все операции портфеля проектов для определения узких мест и их устранения. Число всех операций портфеля проектов $N = \sum_{p=1}^P N_p$. Таким образом, максимальная трудоемкость предложенного алгоритма линейно зависит от числа всех операций портфеля проектов согласно формуле: $n \cdot N$. Качество решения будем определять по значению функции (2.6) при соблюдении ограничений (2.7) – (2.8). Оценка качества решения, найденного с помощью ЭИ метода, приведена в разделе 4.1.5, таблице 4.7 для задачи планирования работ ЗАО «Телесистемы».

Предложенный алгоритм интеллектуального планирования в рамках работы эвристико-имитационного метода осуществляет сдвиг начала выполнения операции с фиксированным шагом с целью устранения узкого места на ограниченных нескладируемых ресурсах для операций с высокими затратами на привлекаемый субподряд. При этом возможны ситуации, когда временные ограничения (2.8) не выполняются, вследствие чего сдвиг не осуществляется, и узкое место сохраняется. Для устранения узких мест за счет сдвига операций на различные временные интервалы, в пределах допустимых ограничениями (2.8), предлагается применять гибридный метод имитационно-эволюционного моделирования, реализуемый в новом методе мультиагентной генетической оптимизации.

2.3. Разработка нового метода МГО

В качестве эволюционного метода были выбраны генетические алгоритмы, интегрируемые с моделью МППР по схеме, предложенной Курейчиком В. В. и его коллегами. Рассмотрим модификацию простого генетического алгоритма (ГА) на основе применения алгоритмов имитации отжига и поиска новизны с целью повышения качества решения задачи. Применим модифицированный ГА в новом методе мультиагентной генетической оптимизации.

Кодирование хромосомы

Применим метод кодирования смещения дат начала работ относительного базового плана, поскольку данный метод не обладает избыточностью при кодировании и поддерживает учет временных ограничений (см. рисунок 2.4).

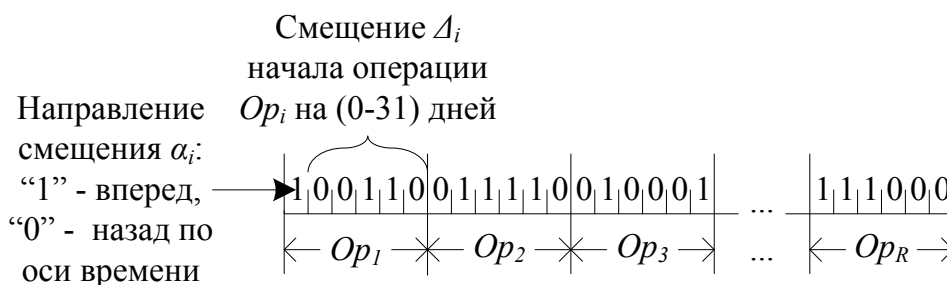


Рис. 2.4. Кодирование особи ГА для задачи планирования работ

Рассмотрим предприятие, реализующее проектные работы силами R отделов. Предприятие выполняет портфель проектов, состоящий из P проектов; суммарное количество всех операций портфеля проектов $N = \sum_{p \in [1..P]} N_p$. В ходе исследований был выделен следующий критерий оптимальности процессов планирования работ: минимизация общей стоимости субподряда.

Гены особи (хромосомы) предназначены для хранения в двоичном формате информации, однозначно определяющей даты начала каждой из операций портфеля с учетом использования информации, отражающей первоначальный (базовый) календарный план выполнения проектов, составленный ЛПР. Первоначальный календарный план определяет точку отсчета – даты начала каждой операции i проекта p : $x_{p,i}^{Init}$.

Особь представляет собой битовую строку-хромосому длиной $6 \cdot N$ бит; гены в строке имеют длину 6 бит и кодируют смещение в днях

даты начала выполнения операции. Из 6 бит генов 1 бит предназначен для кодирования направления смещения $\alpha_{p,i}$, и 5 бит предназначено для кодирования величины смещения $\Delta_{p,i}$ с максимальным смещением в 31 день ($p = 1, \dots, P, i = 1, 2, \dots, N_p$). Таким образом, отдельная хромосома кодирует одно из возможных решений задачи планирования проектных работ – календарный план работ, отражающий планируемые временные интервалы выполнения каждой из операций. В основе кодирования и декодирования особи лежат следующие соотношения:

$$\begin{cases} x_{p,i} = x_{p,i}^{Init} + \Delta_{p,i}, & \alpha_{p,i} = 1 \\ x_{p,i} = x_{p,i}^{Init} - \Delta_{p,i}, & \alpha_{p,i} = 0 \end{cases} \quad (2.11)$$

Ограничения на существование особи выводятся из анализа входной информации по каждой операции портфеля проектов – временного интервала в днях, в рамках которого возможно выполнение операции. При формировании новой особи, входящей в последующую популяцию, с помощью ГА осуществляется декодирование особи (т.е. определение начала выполнения каждой операции $x_{p,i}$) и проверка выполнения критерия существования хромосомы (2.11). В случае неудовлетворения данному критерию операция формирования новой хромосомы (операция применения эволюционных операторов) откатывается и повторяется до тех пор, пока критерий существования не будет выполнен.

Модификация генетического алгоритма

Сложные ОС представляют собой открытые системы, для которых характерно тесное взаимодействие объектов исследования и среды.

Рассмотрим поиск комбинаторной новизны как способ адаптации в открытых системах. Для реализации данного подхода модифицируем простой ГА путем введения понятия «оригинальность решения» в качестве меры приспособленности решения к условиям среды. Оригинальность особи в популяции будем определять с помощью матрицы расстояний Хемминга между особями.

Определим матрицу хемминговых расстояний между парами хромосом популяции $H = (h_{ij})_{i=1, j=1}^N$, где $h_{ij} = d(Ch_i, Ch_j)$ – хеммингово расстояние между i -ой и j -ой хромосомами (Ch_i и Ch_j), равное количеству позиций с несовпадающими значениями генов в хромосомах Ch_i и Ch_j ; N_{ch} – количество хромосом в популяции.

При выборе хромосомы в следующую популяцию в классическом ГА применяются две стратегии скрещивания хромосом. Первая стратегия – *стратегия случайного поиска (ССП)* – ориентирована на отбор хромосом случайным образом. Вторая стратегия – *стратегия поиска экстремума (СПЭ)* – ориентирована на целенаправленный поиск лучших хромосом путем скрещивания наиболее приспособленных к среде особей. Приспособленность i -ой особи к среде оценивается ее функцией пригодности FF_i , $i=1..N_{ch}$.

Модифицируем классический ГА применением *стратегии поиска оригинальности (СПО)*, ориентированной на поиск новых комбинаторных решений в популяции путем скрещивания различных по кодированию хромосом.

Обозначим вероятность выбора хромосомы Ch_i из популяции при применении стратегии случайного поиска как $p_i^{ССП}$, а вероятность выбора хромосомы при применении стратегии поиска экстремума – $p_i^{СПЭ}$. Последняя вероятность рассчитывается с помощью применения закона рулетки к значению функции пригодности хромосомы FF_i . Вероятность выбора хромосомы Ch_i из популяции в пару к хромосоме Ch_j при применении разработанной стратегии поиска оригинальности определяется с помощью применения закона рулетки к значению расстояния Хемминга h_{ij} между хромосомами.

Алгоритм имитации отжига предназначен для комбинации предложенных стратегий; параметр алгоритма t_Q участвует в формировании динамических вероятностей выбора хромосом-родителей для оператора кроссинговера. Рассмотрим методику интегрированного применения АИО и ГА.

Шаг 1. Установить параметры АИО: начальное значение управляемого параметра t_Q ; значение параметра γ , контролирующего скорость изменения управляемого параметра, $0 \leq \gamma \leq 1$.

Шаг 2. Задать параметры ГА: число поколений N_{pop} ; размер хромосомы N_{ch} ; вероятности применения генетических операторов. Установить номер текущего поколения Q : $Q=1$. Сформировать начальную популяцию.

Шаг 3. Применить к текущей популяции Q генетические операторы с вероятностью, зависящей от значения t_Q . Увеличить номер текущего поколения $Q=Q+1$. Изменить значение управляемого параметра t_Q согласно формуле (1.5).

Шаг 4. Проверить условие окончания работы ГА: $Q > N_{pop}$. Если условие выполняется, то переход на Шаг 5, иначе на Шаг 3.

Шаг 5. Останов.

Вероятности применения генетических операторов определяются на основе АИО с целью учета динамического характера работы операторов.

Оператор кроссинговера

Будем применять 5-точечный оператор кроссинговера в связи с большой длиной хромосомы, пропорциональной числу всех планируемых операций.

Вероятности выбора первого и второго родителя из популяции в поколении Q для оператора кроссинговера (ОК) описаны ниже. Вероятность выбора первого родителя должна учитывать как случайный характер выбора, так и целенаправленный выбор на основе стратегии поиска экстремума. При этом вероятность случайного выбора должна снижаться при эволюции поколений, а вероятность применения СПЭ – возрастать. С учетом вышесказанного определим вероятность выбора первого родителя i в поколении Q по формуле:

$$P_i^Q(OK) = \frac{1}{N} \cdot \left(1 - \exp\left(-\frac{1}{t_Q}\right) \right) + p_i^{СПЭ} \cdot \exp\left(-\frac{1}{t_Q}\right) \quad (2.12)$$

Вероятность выбора второго родителя должна учитывать предложенные стратегии поиска оригинальности и поиска экстремума, при этом вероятность применения СПО должна снижаться при эволюции поколений, а вероятность применения СПЭ – возрастать. С учетом вышесказанного определим вероятность выбора второго родителя j для первого родителя i в поколении Q :

$$P_j^Q(OK) = p_{ij}^{СПО} \cdot \left(1 - \exp\left(-\frac{1}{t_Q}\right) \right) + p_j^{СПЭ} \cdot \exp\left(-\frac{1}{t_Q}\right) \quad (2.13)$$

Оператор мутации (ОМ). Определим вероятность применения ОМ в поколении Q с учетом ее снижения при эволюции поколений с целью сохранения полученного генетического материала:

$$P_Q(OM) = P_0(OM) \cdot \left(1 - \exp\left(-\frac{1}{t_Q}\right) \right) \quad (2.14)$$

где $P_Q(OM)$ – начальное значение вероятности применения ОМ.

Оператор инверсии (ОИ). Определим вероятность применения ОИ в поколении Q с учетом ее снижения при эволюции поколений:

$$P_Q(\text{ОИ}) = P_0(\text{ОИ}) \cdot \left(1 - \exp\left(-\frac{1}{t_Q}\right)\right).$$

Функция пригодности

Рассмотрим максимизируемую функцию пригодности, описанную с использованием нормализации минимизируемой целевой функции OF (2.6):

$$FF = OF^{Init} / OF \rightarrow \max, \quad (2.15)$$

где OF^{Init} – начальное значение целевой функции, полученное для начального календарного плана работ, сформированного ЛПР.

Для оценки функции пригодности (2.15) будем применять модель МППР как наиболее полно формализующую процессы ОС, к которым относятся и процессы исполнения работ по портфелю проектов. Управляемые переменные (даты начала выполнения операций проектов $x_{p,i}$) и начальные параметры, описанные при постановке задачи, подаются на вход модели системы. Параметры, формируемые в процессе принятия решений, являются выходами модели: стоимость привлечения субподрядных ресурсов, простой собственных ресурсов каждой компетенции. В модели МППР агенты применяются для реализации алгоритма распределения складировуемых и нескладировуемых ресурсов, учета ограничений на складировуемые ресурсы (2.7), а имитационное моделирование – для описания выполнения операций.

Контур поиска решения задачи планирования работ на основе применения метода мультиагентной генетической оптимизации (МГО) приведен на рисунке 2.5.

Определим число итераций поиска решения с помощью метода МГО. Параметрами метода являются число популяций N_{pop} и число хромосом в популяции N_{ch} . Трудоемкость метода МГО зависит от произведения указанных параметров согласно формуле: $N_{pop} \cdot N_{ch}$. Оценка качества решения, найденного с помощью метода МГО, приведена в разделе 4.1.5, таблице 4.7 для задачи планирования работ ЗАО «Телесистемы».

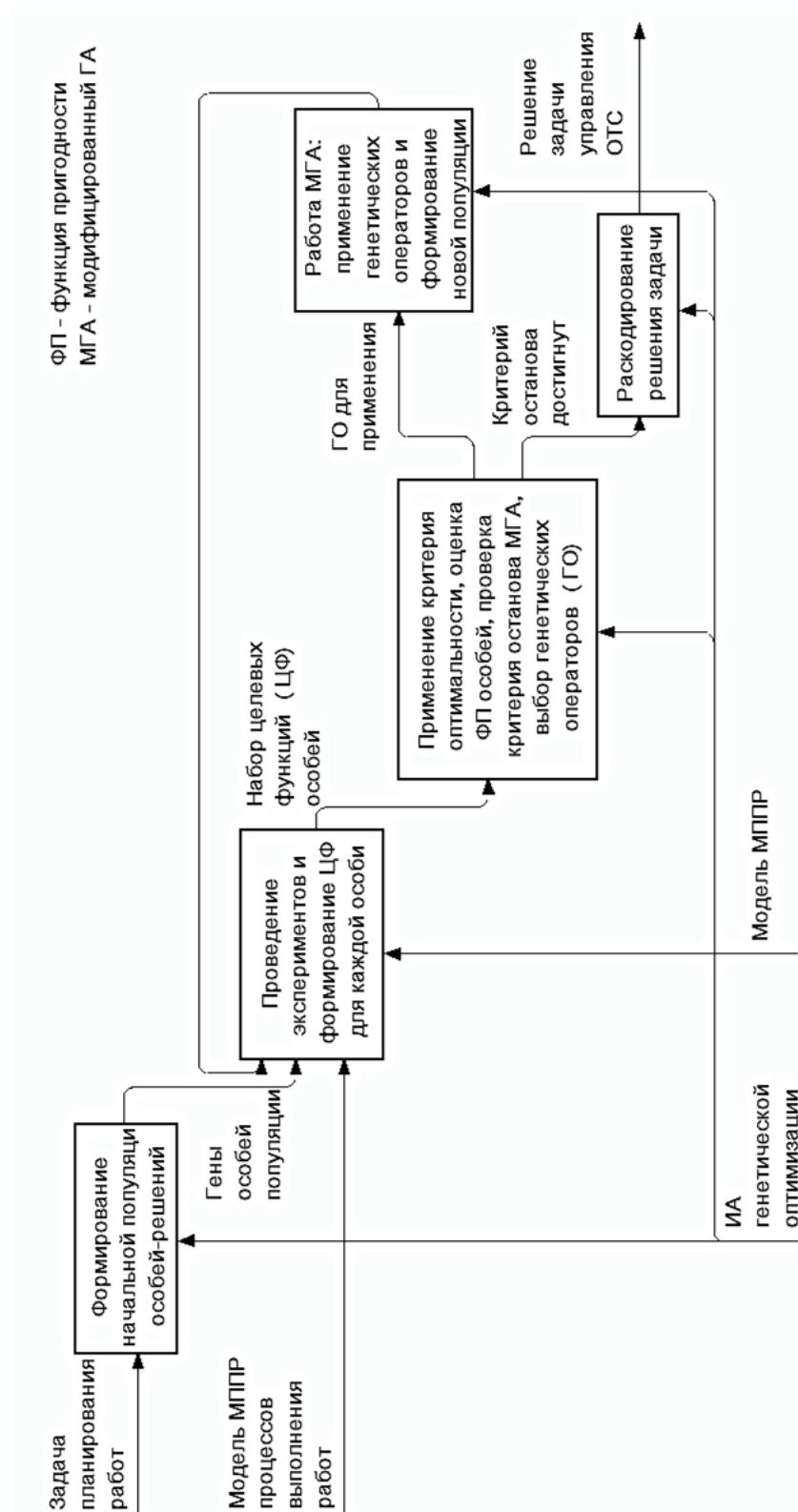


Рис. 2.5. Контур поиска решения задачи планирования на основе метода МГО

Результаты разработки метода МГО опубликованы авторами в [118–126, 154–156]. Выполнение метода МГО включает в себя следующие шаги.

1. Разработка имитационной модели МППР исполнения работ по портфелю проектов с учетом следующих правил: на вход модели подается календарный план работ, на выходе модели формируется оценка выбранной целевой функции планирования (стоимости субподрядных работ).

2. Настройка параметров работы модифицированного ГА и АИО: числа генерируемых популяций, начальных вероятностей применения генетических операторов, начального значения параметра АИО и скорости изменения параметра АИО.

3. Формирование набора календарных планов работ случайным образом или с помощью эвристик. Оценка для текущего набора календарных планов значений целевой функции с помощью проведения экспериментов с моделью МППР. Кодирование данного набора календарных планов в популяцию решений ГА.

4. Применение к текущей популяции решений генетических операторов и формирование следующей популяции решений, которая становится текущей.

5. Декодирование текущей популяции решений в текущий набор календарных планов.

6. Оценка для текущего набора календарных планов значений целевой функции с помощью проведения экспериментов с моделью МППР.

7. Проверка выполнения критерия останова ГА. Если критерий выполнен (количество сформированных популяций достигло заданного числа), то переход на п.8, иначе на п.4.

8. Выбор лучшего решения (календарного плана работ) из сформированных популяций с точки зрения оптимизации целевой функции планирования.

2.4. Сравнительный анализ метода МГО и методов планирования

Рассмотрим следующие методы, поддерживающие решение задачи планирования проектных работ и описанные в разделе 1.2: метод критического пути, метод планирования на основе приближенного оптимизационного алгоритма Гимади Э. Х., метод Клейменовой Е. М. и Скобелева П. О., метод Курейчика В. В. и новый метод МГО.

Анализ метода критического пути с точки зрения применения к решаемой задаче планирования проектных работ позволяет выделить следующие недостатки данного метода:

1) отсутствие механизмов оптимизации затрат на привлечение субподрядных нескладируемых ресурсов;

2) отсутствие средств формализации сценариев принятия решений при распределении ресурсов по работам (построения моделей ЛПР, работающих со знаниями);

3) отсутствие учета ограниченных складированных ресурсов (потребляемых и производимых в результате выполнения операций проекта).

В результате анализа применимости модели МППР для реализации метода критического пути были сформулированы следующие принципы разработки модели, приведенные авторами в [80]:

1. При построении модели МППР процессов выполнения проектных работ необходимо классифицировать процессы на три типа по используемому приоритету процессов:

– процессы критического пути, которые относятся к группе наивысшего приоритета;

– процессы, предшествующие процессам критического пути, которые относятся к группе среднего приоритета;

– остальные процессы, которые относятся к группе низшего приоритета.

2. Если предметная область допускает использование прерываний процессов, то при построении модели МППР у процесса могут быть использованы относительный и абсолютный приоритет, иначе у процесса устанавливается запрет на прерывание.

3. При моделировании проектных работ и балансировки (распределения) нескладируемых ресурсов применение «выталкивающей» стратегии (FIFO).

Использование указанных правил разработки моделей МППР позволяет полностью реализовать функционал метода критического пути при применении имитационного мультиагентного моделирования. Данные методы моделирования, в отличие от метода критического пути, дополнительно поддерживают учет потребления, поставок и времени жизни складированных ресурсов.

Анализ применения метода планирования на основе оптимизационного алгоритма Гимади Э. Х. к решению рассматриваемой задачи

позволил выделить следующие достоинства метода: рассмотрение ограниченных складываемых и нескладываемых ресурсов; высокое качество найденного решения при сниженных затратах на проведение поиска решения; моделирование потребления и производства складываемых ресурсов с помощью непрерывной функции интенсивности (эпюра) потребления. Однако, как показано в работе [50], применение непрерывных функций для описания потребления и производства складываемых ресурсов в исследуемых дискретных процессах ОС приводит к запаздыванию захвата входных ресурсов и опережению формирования выходных ресурсов по отношению к реальным процессам. Данное замечание накладывает ограничение на возможность применения функций-эпюр для учета потребления ограниченных складываемых ресурсов при решении рассматриваемой задачи планирования дискретных БП. Также за рамками работы данного метода остается вопрос анализа и оптимизации привлечения субподрядных нескладываемых ресурсов в случае возникновения противоречий между ресурсными ограничениями и директивными сроками выполнения работ.

Анализ применения метода Клейменовой Е. М. и Скобелева П. О. к решению поставленной задачи планирования позволил выделить следующие недостатки:

- 1) отсутствие методов оптимизации стоимости привлекаемых субподрядных ресурсов;
- 2) отсутствие поддержки анализа альтернативных планов работ и распределений ресурсов по работам;
- 3) отсутствие учета складываемых ресурсов (потребления, производства и времени жизни ресурса).

К недостаткам применения метода Курейчика В. В. к рассматриваемой задаче планирования относятся следующие:

- 1) ориентация метода на широкий класс задач управления ОС, что приводит к необходимости разработки пользователем онтологии задачи планирования и разработки собственного генетического алгоритма, предназначенного для решения задачи планирования (определение способа кодирования фенотипа-решения в генотип-хромосому, разработка генетических операторов согласно выбранному представлению хромосомы, определение условия окончания работы алгоритма);

2) отсутствие механизмов учета и оптимизации стоимости привлекаемых субподрядных ресурсов;

3) отсутствие средств формализации сценариев принятия решений при распределении ресурсов по работам.

Результаты сравнительного анализа представлены в таблице 2.4 и опубликованы авторами в [123]. Как следует из таблицы ни один из методов, за исключением метода МГО, не обладает полной функциональностью для решения рассматриваемой задачи. Так, ни один из методов не поддерживает оптимизацию стоимости привлечения субподрядных ресурсов для обеспечения требуемого качества решения согласно формуле (2.6). Только методы Гимади Э. Х., Курейчика В. В. и МГО обеспечивают учет складированных ресурсов (поставок и потребления) для выполнения ограничений (2.7); только метод МГО учитывает при этом время жизни складированных ресурсов. В целом, можно сделать вывод о том, что все анализируемые методы планирования направлены на решение задачи балансировки нескладированных ресурсов с целью минимизации времени выполнения работ по портфелю проектов. Полным функционалом для решения поставленной задачи планирования проектных работ с учетом оптимизации стоимости субподрядных ресурсов (2.6) и выполнения ограничений (2.7) – (2.8) обладает новый метод МГО.

Метод МГО позволяет: реализовывать алгоритм распределения складированных и нескладированных ресурсов с помощью имитационного, мультиагентного и экспертного моделирования; осуществлять оптимизацию затрат на привлечение субподряда путем анализа альтернативных календарных планов с помощью интеграции генетических алгоритмов и имитационного моделирования. К недостаткам метода МГО можно отнести отсутствие механизмов минимизации длины расписания и отсутствие учета функции непрерывного потребления (производства) складированных ресурсов. Данные недостатки связаны со спецификой анализируемой предметной области: дискретностью рассматриваемых БП и наличием временных рамок выполнения проектов, в связи с чем не требуется плотная упаковка работ по проекту.

Полученные теоретические результаты (метод мультиагентной генетической оптимизации) позволяют реализовать программное обеспечение, относящееся к классу интеллектуальных систем принятия решений.

Таблица 2.4

Сравнительный анализ методов планирования

| Критерий сравнения | МКП | Метод Гимади Э.Х. | Метод Клейменовой Е.М. | Метод Курейчика В.В. | Новый метод МГО |
|---|-----|----------------------|---------------------------|-------------------------|--------------------|
| Решаемая задача планирования | | | | | |
| Планирование календарных сроков | + | + | + | + | + |
| Учет и балансировка нескладируемых ресурсов | + | + | + | + | + |
| Учет складируемых ресурсов (потребления и производства) | НЕТ | + | НЕТ | + | + |
| Учет времени жизни складируемых ресурсов | НЕТ | НЕТ | НЕТ | НЕТ | + |
| Учет нескладируемых субподрядных (с/п) ресурсов | НЕТ | НЕТ | НЕТ | НЕТ | + |
| Минимизация длины расписания | + | + | + | НЕТ | НЕТ |
| Оптимизация стоимости субподрядных ресурсов | НЕТ | НЕТ | НЕТ | НЕТ | + |
| Используемые подходы при решении задачи планирования | | | | | |
| Сетевое представление | + | + | НЕТ | + | + |
| Дискретно-событийное имитационное моделирование | НЕТ | НЕТ | НЕТ | + | + |
| Моделирование непрерывного потока складируемых ресурсов | НЕТ | + | НЕТ | НЕТ | НЕТ |
| Мультиагентное моделирование | НЕТ | + | + | НЕТ | + |
| Эволюционное моделирование | НЕТ | НЕТ | НЕТ | + | + |
| Экспертное моделирование | НЕТ | НЕТ | НЕТ | + | + |

| Критерий сравнения | МКП | Метод Гимади Э.Х. | Метод Клейменовой Е.М. | Метод Курейчика В.В. | Новый метод МГО |
|--|---|---|---------------------------|-------------------------|---|
| Оценка эффективности и производительности метода | | | | | |
| Оценка удаленности приближенного решения от оптимального | Сравнение с длиной критического пути $T_{кр}$ | Сравнение с длиной критического пути $T_{кр}$ | Не проводилась | Не проводилась | Сравнение с нулевыми затратами на сублимод. $S_{с/н}=0$ |
| Оценка числа итераций (числа экспериментов), N – число работ, N_{pop} – число популяций ГА, N_{ch} – число хромосом попул. | N^2 | $M \log_2 N$ | Не проводилась | $N_{pop} N_{ch}$ | $N_{pop} N_{ch}$ |
| Оценка числа итераций для работ «Телесистемы» $N = 35, N_{pop} = N_{ch} = 10$ | 1225 | 180 | Не проводилась | 100 | 100 |

2.5. Выводы

1. Выполнен анализ стратегий распределения нескладируемых ресурсов по работам при решении задачи планирования проектных работ. На основе выбранной стратегии распределения ресурсов разработан новый эвристико-имитационный метод планирования, интегрирующий методы имитационного мультиагентного и экспертного моделирования с эвристическим алгоритмом смещения начала выполнения работ в заданных временных рамках.

2. Показано накопление ошибки при использовании имитационной модели без агентов для анализа процессов выполнения работ. Применение агентов позволяет избежать ошибок при моделировании анализируемых процессов.

3. Разработан новый метод мультиагентной генетической оптимизации, предназначенный для проведения календарного планирования проектных работ. Для разработанного метода модифицирован простой генетический алгоритм путем интеграции алгоритма имитации отжига и алгоритма поиска новизны.

4. Проведено сравнение разработанного метода МГО с существующими методами планирования работ: МКП, методом планирования на основе оптимизационного алгоритма Гимади Э. Х., методом Клейменовой Е. М. и Скобелева П. О., методом Курейчика В. В., предполагающим проведение планирования с помощью интеграции генетических алгоритмов и имитационного моделирования. Результаты сравнения показали следующие преимущества нового метода для решения поставленной задачи планирования: проведение оптимизации затрат на привлечение нескладируемых субподрядных ресурсов, учет складируемых ресурсов при планировании (производства и потребления, времени жизни ресурса).

5. Полученные теоретические результаты позволяют реализовать программное обеспечение, которое использует методы имитационного мультиагентного и эволюционного моделирования для решения задачи планирования бизнес-процессов и проектных работ.

3. ПРОГРАММНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ МЕТОДА МГО

3.1. Реализация метода МГО в системе BPsim

3.1.1. Постановка задачи на разработку интеллектуального агента (визарда)

Для реализации нового метода МГО были выбраны продукты семейства BPsim как наиболее полно отвечающие требованиям много-модельного моделирования и поддержки принятия решений в области управления ОС. В настоящий момент семейство представлено следующими продуктами: СДМС BPsim.MAS, системой технико-экономического проектирования BPsim.MSN и CASE-средством проектирования информационных систем BPsim.SD.

Для управления разработанными моделями и осуществления их интеграции, системы BPsim.MSN и BPsim.SD поддерживают разработку интеллектуальных агентов (визардов, программных помощников). Визарды в рамках единого программного обеспечения призваны обеспечивать взаимодействие пользователя как с отдельными моделями системы, так и с их объединением, обеспечивая автоматизированную интеграцию различных представлений системы в зависимости от типов решаемых задач.

Метод разработки визарда с помощью продуктов семейства BPsim представлен на рисунке 3.1 в стандарте IDEF0. Определение функционала, построение концептуальной модели предметной области и проектирование алгоритмов работы визарда осуществляется в системе поддержки принятия решений (СППР) – BPsim.MSN – при помощи DFD-диаграмм, диаграмм классов, прецедентов и последовательностей с конвертацией одних диаграмм в другие. В CASE-средстве выполняется настройка экранных форм пользовательского интерфейса, генерируется код визарда, структура базы данных и документация.

Продукты семейства BPsim поддерживают применение различного инструментария, методов и моделей на отдельных этапах принятия решений (табл 3.1).

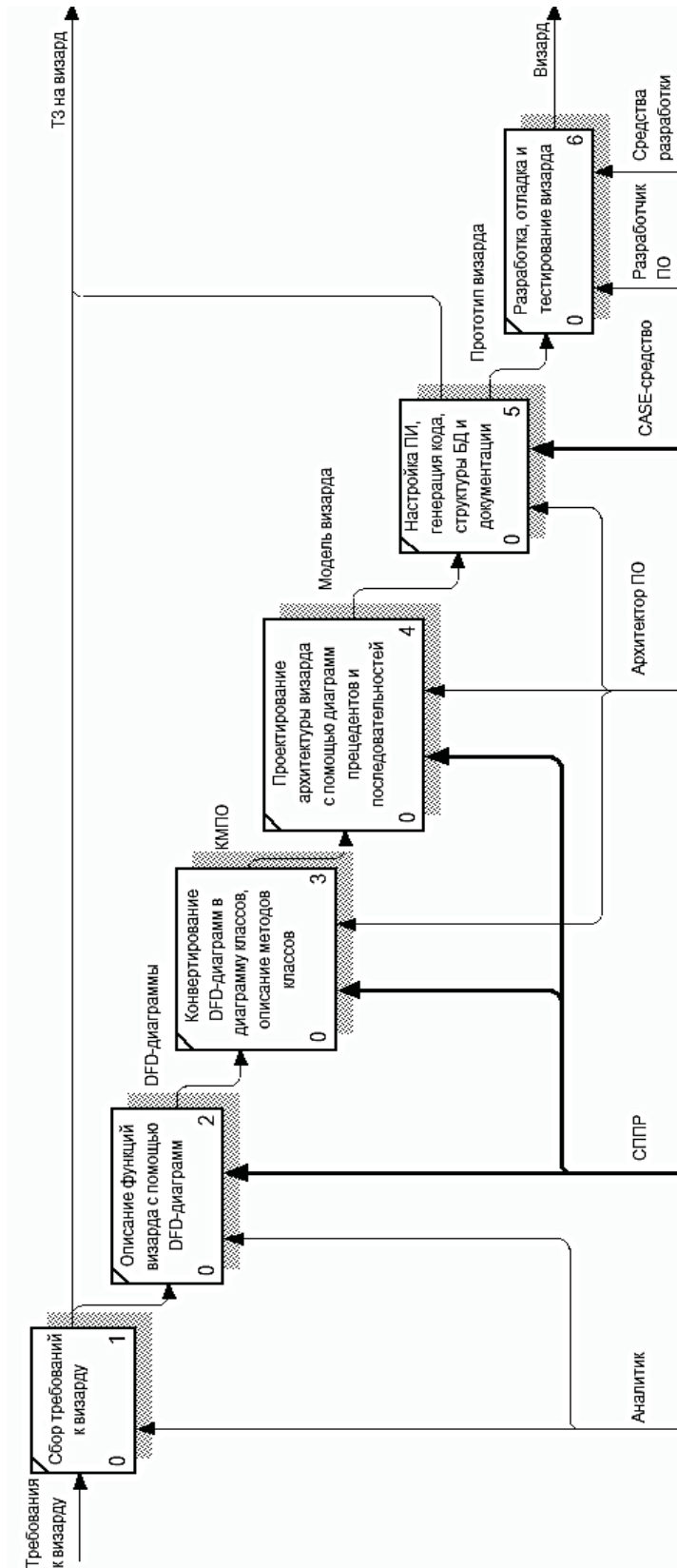


Рис. 3.1. Метод разработки визарда с помощью продуктов BPsim

Т а б л и ц а 3 . 1

Поддержка продуктами семейства BPsim различных инструментариев,
методов и моделей

| Этап | Инструментарий |
|--|---|
| Описание процессов | Нотация IDEF0 |
| | Нотация DFD |
| | Диаграмма прецедентов UML |
| | Нотация МППР |
| Проектирование программного обеспечения (ПО) | Диаграммы DFD, прецедентов, классов, последовательности |
| Формализация знаний | Семантические сети |
| | Фреймы |
| | Продукции |
| Поддержка принятия решений | Имитационное моделирование |
| | Мультиагентное моделирование |
| | Ситуационное управление |
| | Диалоговые экспертные системы |

Разработка фреймовой системы и ее применение приведены в [153].

На рисунке 3.2 приведен подлежащий реализации алгоритм совместного применения продуктов семейства BPsim и разрабатываемого ИА в рамках решения задачи планирования работ.

ИА генетической оптимизации предназначен для проведения поиска очередной популяции решений и передачи информации о каждом решении в систему моделирования BPsim.MAS. Система BPsim.MAS предназначена для построения модели МППР процессов выполнения проектных работ и оценки с помощью проведения экспериментов с моделью функции пригодности текущей особи-хромосомы (закодированного календарного плана работ). Система BPsim.MSN предназначена для осуществления пользователем собственного кодирования фенотипа решения (календарного плана работ) в генотип (битовую строку-хромосому). Программная реализация интеграции продуктов семейства BPsim и ИА генетической оптимизации возможна благодаря организации единой базы данных продуктов на базе MS SQL-сервера.

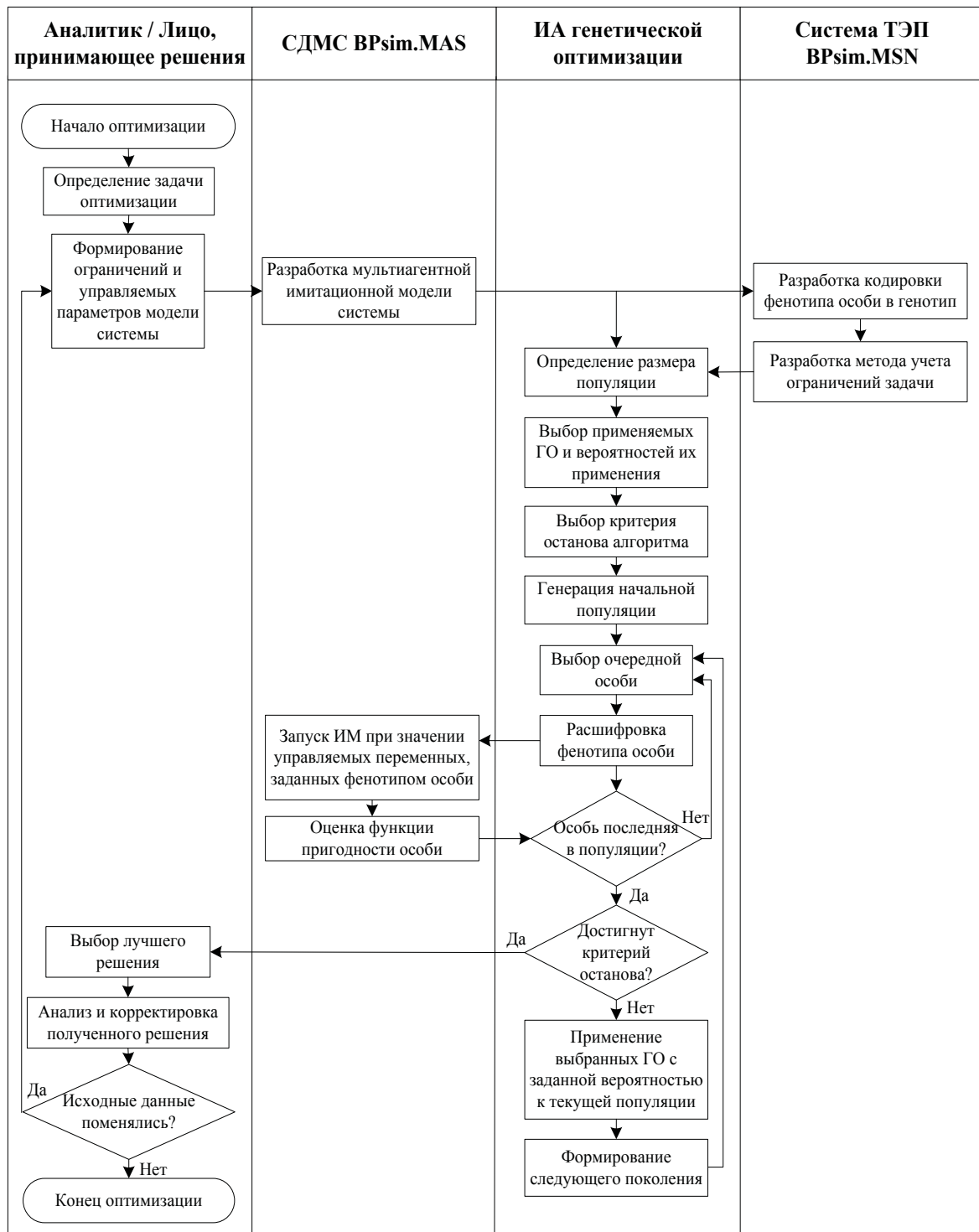


Рис. 3.2. Алгоритм работы ПК мультиагентной генетической оптимизации

Сформулируем требования, предъявляемые к ПК визарда МГО, предназначенного для решения задачи планирования.

1. Интеграция подходов моделирования, отражающих различные аспекты процессов проектного планирования и исполнения работ: имитационного, экспертного, мультиагентного и эволюционного подходов.

2. Описание моделей системы с использованием графических нотаций: мультиагентных процессов преобразования ресурсов и языка UML.

3. Предоставление пользователю возможности настройки работы модифицированного ГА на конкретные условия задачи планирования с помощью задания параметров ГА: применяемых генетических операторов (ГО), вероятностей их применения, размера популяции, критерия останова, правила формирования начальной популяции.

4. Предоставление пользователю возможности соотнесения эволюционной и имитационной моделей предметной области планирования с помощью технологии визарда – диалогового программного помощника.

5. Поддержка разработки пользователем собственного способа решения задачи планирования с помощью описания вариантов кодировки решения задачи в гены особи ГА и оценки ФП решений с помощью ИМ.

3.1.2. Построение DFD-диаграмм программного комплекса визарда

Функции разрабатываемого ПК связаны с возможностью работы пользователя с ИА (визардом) мультиагентной генетической оптимизации. С помощью DFD-диаграммы определим последовательность действий пользователя по шагам при работе с визардом, а также определим хранилища данных, представляющих собой структуру базы данных. DFD-диаграмма функционала ПК, разработанная в системе BPsim.MSN, представлена на рисунке 3.3.

При работе с ПК ЭМ ОС пользователю предлагается последовательно пройти 5 шагов, реализующих различные стадии решения задачи планирования проектных работ. На *стадии 1а* пользователь с помощью хранилища данных «Задача» осуществляет выбор готового решения типовой задачи планирования работ, включающего в себя заданное кодирование решения. На *стадии 1б* пользователю необходимо описать постановку оригинальной задачи. *Стадия 2* предназначена для установки пользователем соответствия между ИМ и ЭМ.

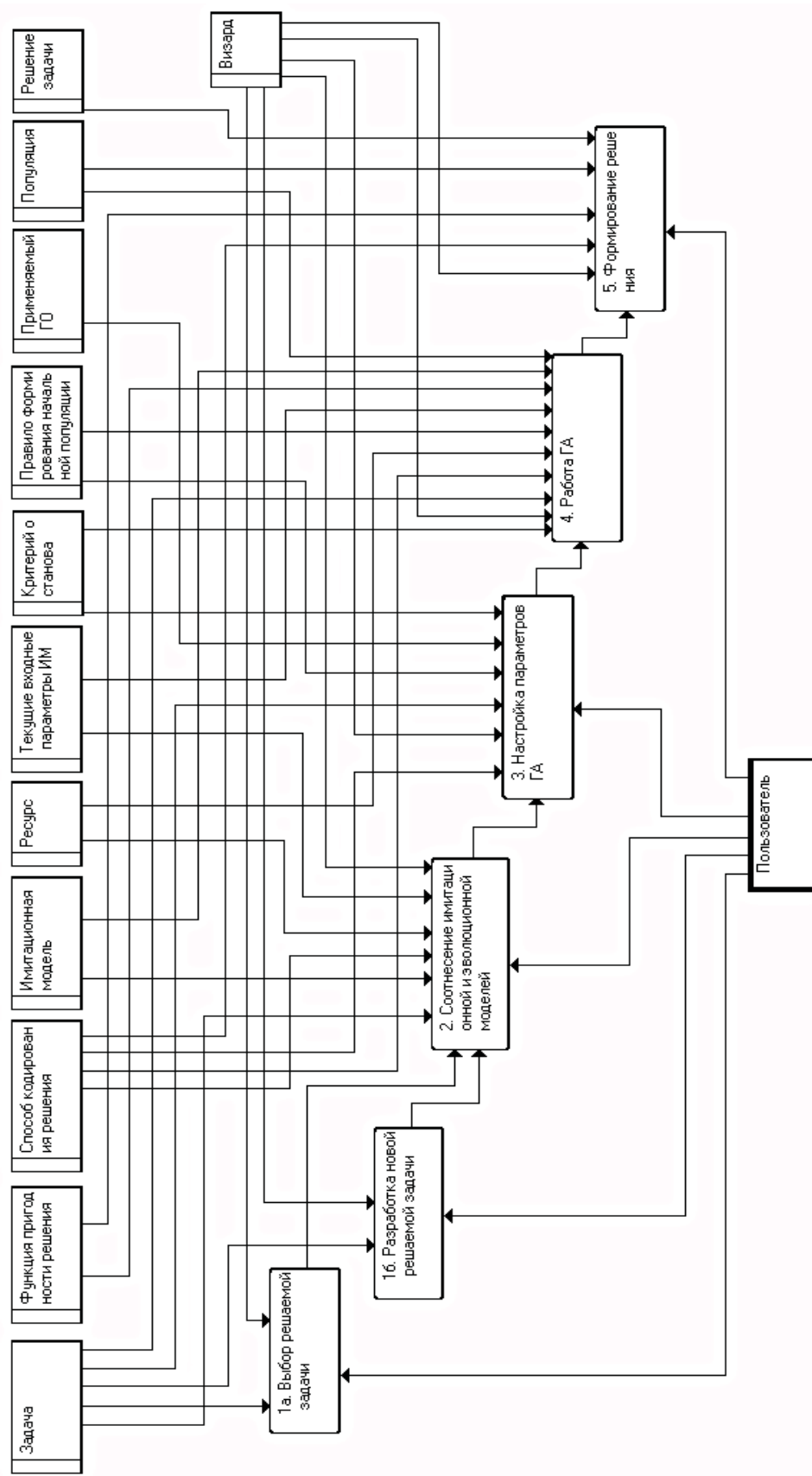


Рис. 3.3. DFD-диаграмма функционала ПК визарда МГО

С данной целью пользователю сначала предлагается соотнести с решаемой задачей планирования ресурсы имитационной модели, отражающие управляемые переменные и целевой функционал задачи. Далее пользователю необходимо установить соответствие между выбранными ресурсами ИМ и генами и функцией пригодности закодированного решения (календарного плана). На *стадии 3* пользователь осуществляет настройку следующих параметров модифицированного ГА: размера популяции, правила формирования начальной популяции, критерия останова, набора применяемых ГО и начальных вероятностей их применения, параметров работы ГА. Поскольку в зависимости от значений параметров ГА скорость сходимости и качество решения задачи планирования будут варьироваться, инструмент настройки параметров ГА представляет особую ценность. Этапы *стадии 4* осуществляются без участия пользователя с помощью ИА МГО (см. рисунок 3.4).

На вход ИА подаются заданные параметры ГА и ресурсы ИМ, связывающие эволюционное и имитационное представления системы. По окончании работы ИА МГО формирует популяцию решений задачи планирования, расположенную в хранилище данных «Популяция» и набор ФП для каждого решения, расположенный в хранилище данных «Функция пригодности решения».

На *стадии 5* без участия пользователя осуществляется выбор решения с лучшей ФП из популяций, сгенерированных ИА МГО. Далее пользователь оценивает данное решение и делает заключение о его удовлетворении или неудовлетворении предъявляемым требованиям. Решение каждой конкретной задачи планирования фиксируется ПК в хранилище данных «Решение задачи». В дальнейшем пользователь может использовать найденное сочетание способа кодирования решения, расчета ФП и значений параметров ГА для решения подобных задач проектного планирования в случае удовлетворительного результата. В противном случае возможен запуск нового визарда, повторный выбор данной задачи и изменение в ходе ее решения параметров ГА, соотносимой ИМ или разработка нового способа кодирования решения.

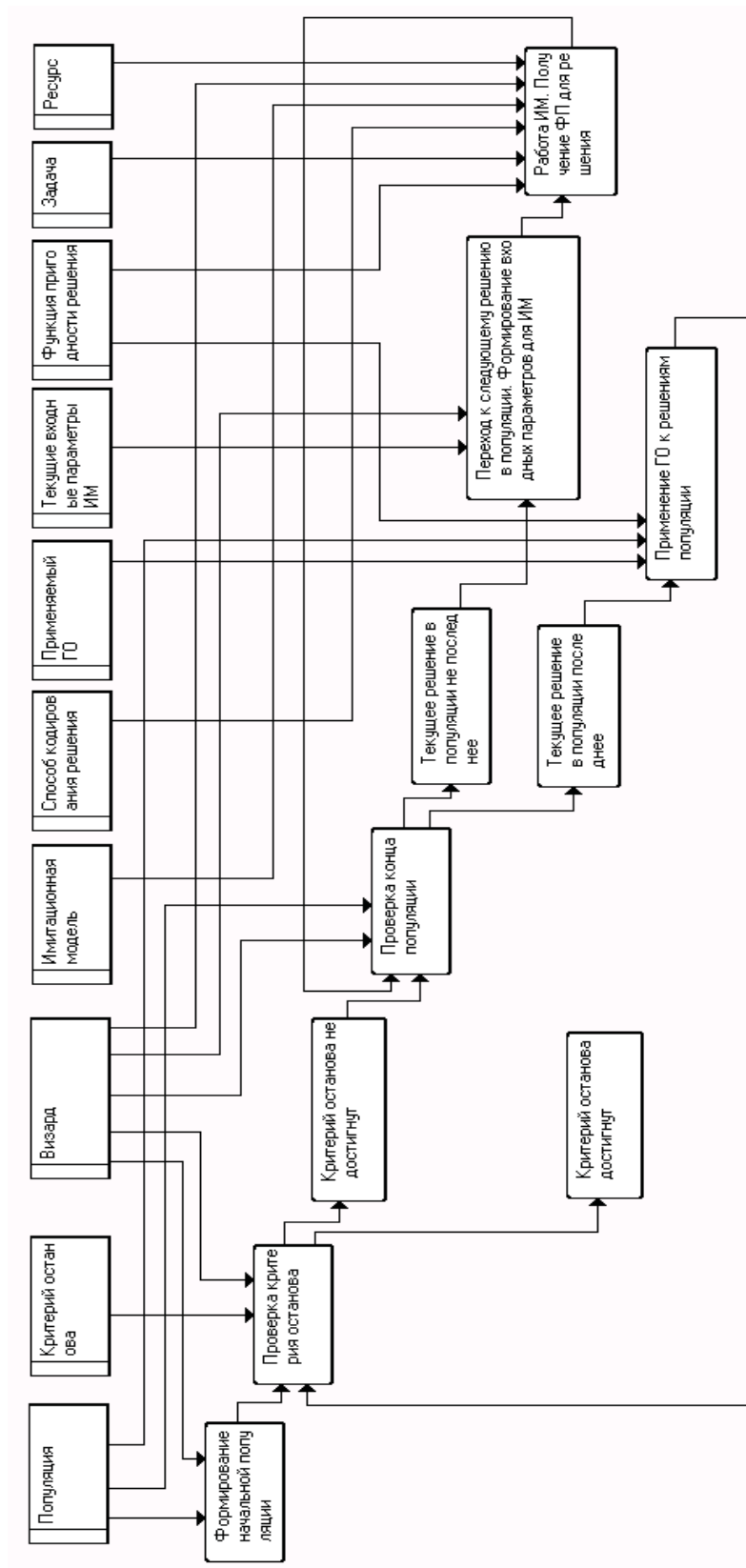


Рис. 3.4. Декомпозиция DFD-функции «Работа ГА»

3.1.3. Проектирование диаграммы классов и реализация визарда

Проектирование диаграммы классов ПК визарда МГО осуществлялось в системе BPsim.MSN путем конвертирования хранилищ данных, определенных при построении функциональных DFD-диаграмм ПК (см. рисунок 3.5).

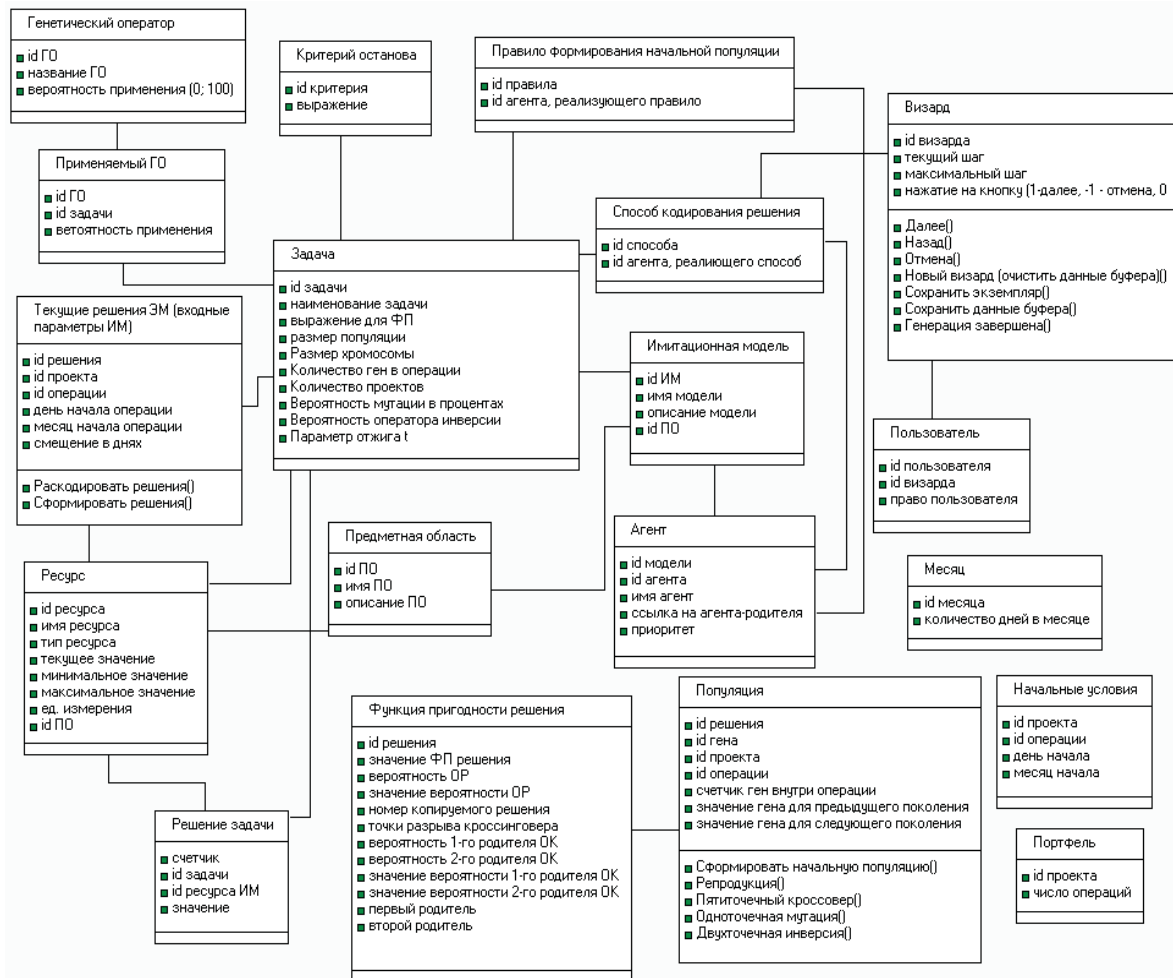


Рис. 3.5. Диаграмма классов ПК визарда МГО

Примем следующие обозначения:

N_{Pop} – размер популяции (количество хромосом в популяции);

N_{Chr} – размер хромосомы (количество генов в хромосоме);

Inv – вероятность выполнения инверсии, проценты;

$Gene(K, M)$ – значение гена M хромосомы K , $K=1..N_{Pop}$, $M=1..N_{Chr}$;

$Gene1(K, M)$ – вспомогательная таблица значений генов хромосом;

$FF(K)$ – значение функции пригодности хромосомы K , $K=1..N_{Pop}$;
 $Prob(K)$ – вероятность выбора копии хромосомы K при репродукции, $K=1..N_{Pop}$;
 $RV(K)$ – случайное значение от 0 до 100 для хромосомы K , $K=1..N_{Pop}$;
 $Param(K)$ – значение раскодированного решения (календарного плана работ) для хромосомы K , $K=1..N_{Pop}$;
 $Number$ – номер хромосомы / гена;
 N_{PopNew} – вспомогательный размер популяции;
 Sum, Sum_{RV} – сумматоры;
 K, L, M – счетчики;
 $Round(x)$ – функция округления дробного числа x ;
 $Random(x)$ – функция, возвращающая целое случайное значение из $[0, x]$.

Алгоритм декодирования хромосом популяции $Gene(K, M)$ в решения $Param(K)$ представлен на рисунке 3.6. Декодирование хромосомы K происходит согласно зависимостям, определенным в формуле (2.11).

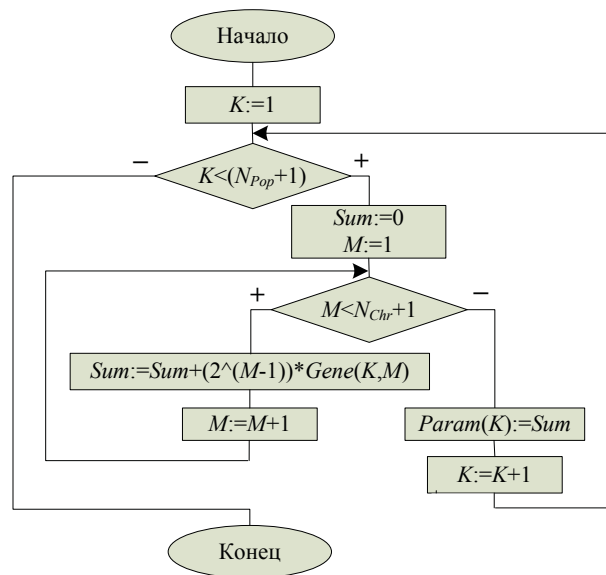


Рис. 3.6. Блок-схема алгоритма декодирования хромосом популяции

Алгоритм репродукции популяции $Gene(K, M)$ представлен на рисунке 3.7. При репродукции хромосомы копируются пропорционально их функциям пригодности во вспомогательную таблицу $Gene1(K, M)$. Вероятность копирования хромосомы K определяется с помощью селекции на основе рулетки.

Ниже на рисунках 3.8 и 3.9 представлено описание указанных алгоритмов в методах классов ПК визарда МГО с помощью языка Transact-SQL.

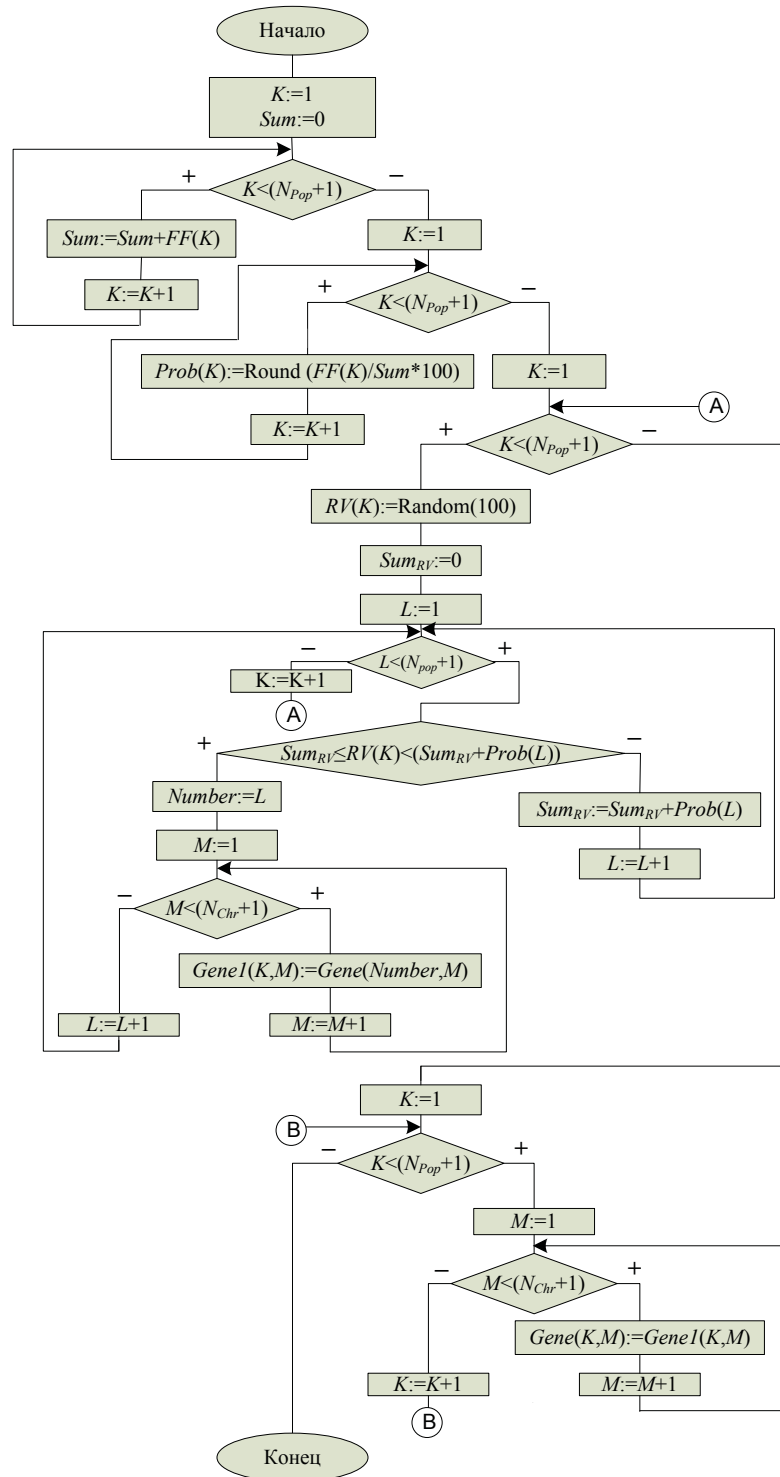


Рис. 3.7. Блок-схема алгоритма репродукции популяции Gene(K,M)

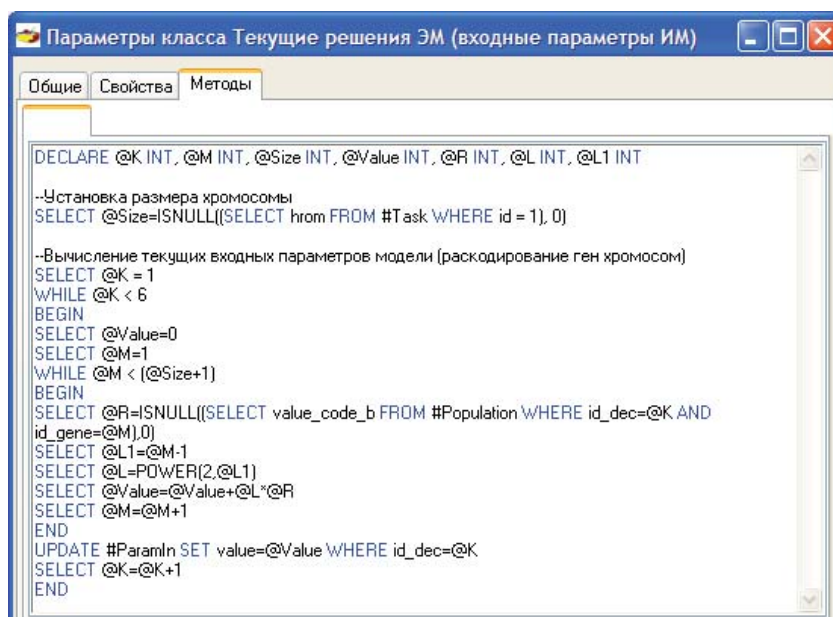


Рис. 3.8. Фрагмент кода метода класса «Текущие решения ЭМ»

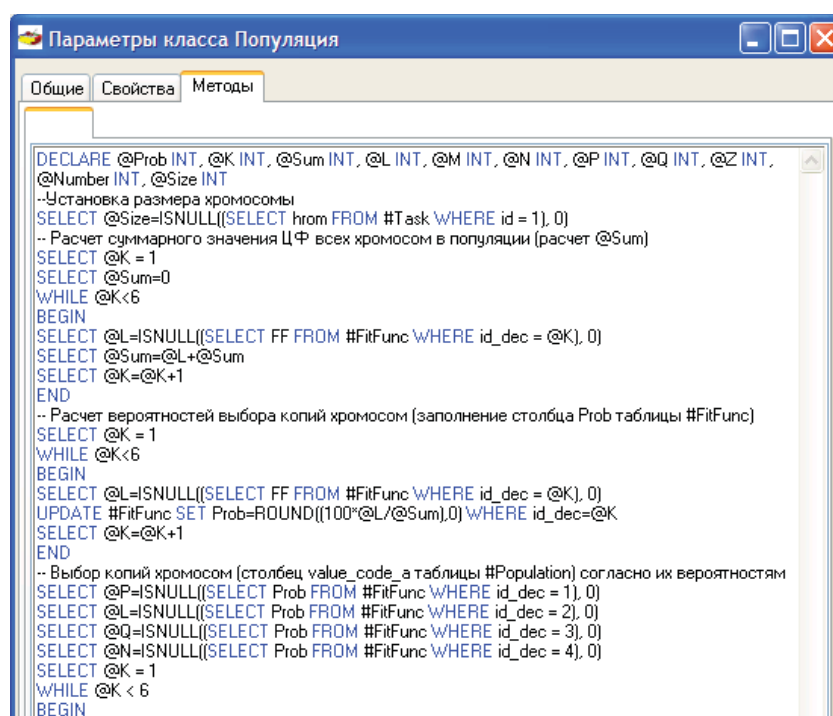


Рис. 3.9. Фрагмент кода метода класса «Популяция»

Порядок применения разработанных методов классов ПК был описан с помощью диаграммы последовательности языка UML в BPsim.MSN (см. рисунок 3.10).

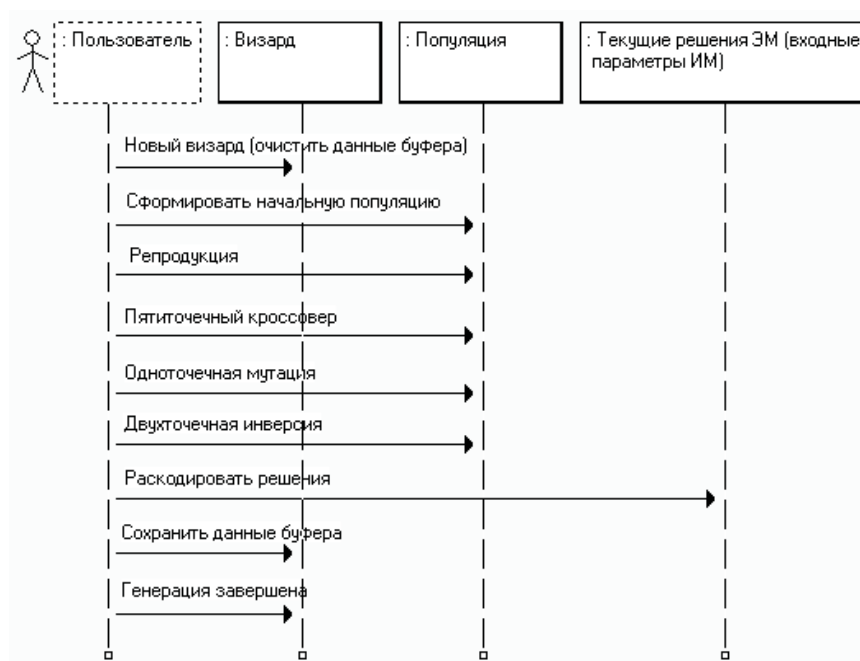


Рис. 3.10. Диаграмма последовательности ПК визарда МГО

Методы класса «Визард» (см. рисунок 3.11) предназначены для описания пошагового движения пользователя в ходе диалога с ИА МГО и отображения определенной последовательности экранных форм диалога. Также методы предназначены для манипуляций с данными буфера, так как все изменения в базе данных в ходе работы ИА проводятся над буферными копиями таблиц.

| Параметры класса Визард | | | | | |
|-------------------------|---------------------------------------|---------------|--------|--|-----------------------------------|
| Общие Свойства Методы | | | | | |
| № | Имя | Тип возв.знач | Доступ | Условие запуска | SQL-текст |
| 1 | Далее | Текст | | | UPDATE #Wizard SET OnBtnClick=1 0 |
| 2 | Назад | Текст | | | UPDATE #Wizard SET OnBtnClick=0 |
| 3 | Отмена | Текст | | | UPDATE #Wizard SET OnBtnClick=0 |
| 4 | Новый визард (очистить данные буфера) | Текст | Public | SELECT cnt=COUNT(*) IF :Q = 1 BEGINDELETE FROM # | 10 |
| 7 | Сохранить экземпляр | Текст | | SELECT cnt=COUNT(*) SAVEDATA(#Wizard) | 0 |
| 9 | Сохранить данные буфера | Текст | | SELECT cnt=COUNT(*) SAVEDATA(#Population)SAVEDAT | 0 |
| 11 | Генерация завершена | Текст | | SELECT cnt=COUNT(*) | 9 |
| 12 | Ввести начальные условия | Текст | | SELECT cnt=COUNT(*) | DECLARE @Size_POP INT, @Size_ 11 |

Рис. 3.11. Методы класса «Визард»

Формы пользовательского интерфейса визарда МГО представлены на рисунках 3.12–3.14.

Модуль обмена данными. Установка соответствия параметров моделей

Предметная область: Модель поиска решения: Класс:

Соответствие между моделями

| ID | Ресурсы/средства | Рес./Ср-во | № экземпляра | id решения | id проекта | id операции | день начала операции | месяц начала операции |
|---------|----------------------------|------------|--------------|------------|------------|-------------|----------------------|-----------------------|
| iRes101 | День начала операции 1.1 | <10:3> | 1 | 1 | 1 | 1 | 7 | 3 |
| iRes102 | Месяц начала операции 1.1 | <1:4> | 2 | 1 | 1 | 2 | 23 | 2 |
| iRes103 | День начала операции 2.1 | <1:5> | 3 | 1 | 1 | 3 | 7 | 7 |
| iRes104 | Месяц начала операции 2.1 | <2:4> | 4 | 1 | 1 | 4 | 19 | 4 |
| iRes105 | День начала операции 1.2 | <2:5> | 5 | 1 | 1 | 5 | 15 | 4 |
| iRes106 | День начала операции 1.3 | <3:4> | 6 | 1 | 1 | 6 | 31 | 3 |
| iRes107 | День начала операции 1.4 | <3:5> | 7 | 1 | 1 | 7 | 25 | 6 |
| iRes108 | День начала операции 1.5 | <4:4> | 8 | 1 | 1 | 8 | 16 | 8 |
| iRes109 | День начала операции 1.6 | <4:5> | 9 | 1 | 1 | 9 | 17 | 8 |
| iRes110 | День начала операции 1.7 | <5:4> | 10 | 1 | 1 | 10 | 20 | 1 |
| iRes111 | День начала операции 1.8 | <5:5> | 11 | 1 | 1 | 11 | 1 | 7 |
| iRes112 | День начала операции 1.9 | <6:4> | 12 | 1 | 2 | 1 | 30 | 8 |
| iRes113 | День начала операции 1.10 | <6:5> | 13 | 1 | 2 | 2 | 26 | 8 |
| iRes114 | День начала операции 1.11 | <7:4> | 14 | 1 | 2 | 3 | 30 | 8 |
| iRes115 | Месяц начала операции 1.2 | <7:5> | 15 | 1 | 2 | 4 | 9 | 9 |
| iRes116 | Месяц начала операции 1.3 | <8:4> | 16 | 1 | 3 | 1 | 10 | 10 |
| iRes117 | Месяц начала операции 1.4 | <8:5> | 17 | 1 | 3 | 2 | 13 | 10 |
| iRes118 | Месяц начала операции 1.5 | <9:4> | 18 | 1 | 3 | 3 | 15 | 8 |
| iRes119 | Месяц начала операции 1.6 | <9:5> | 19 | 1 | 4 | 1 | 4 | 9 |
| iRes120 | Месяц начала операции 1.7 | <10:4> | 20 | 1 | 4 | 2 | 15 | 9 |
| iRes121 | Месяц начала операции 1.8 | <10:5> | 21 | 1 | 5 | 1 | 25 | 5 |
| iRes122 | Месяц начала операции 1.9 | <11:4> | 22 | 1 | 5 | 2 | 14 | 10 |
| iRes123 | Месяц начала операции 1.10 | <11:5> | 23 | 1 | 6 | 1 | 14 | 5 |
| iRes124 | Месяц начала операции 1.11 | <12:4> | 24 | 1 | 6 | 2 | 21 | 8 |
| iRes125 | День начала операции 2.2 | <12:5> | 25 | 1 | 7 | 1 | 15 | 4 |
| iRes126 | День начала операции 2.3 | <13:4> | 26 | 1 | 7 | 2 | 18 | 7 |
| iRes127 | День начала операции 2.4 | <13:5> | 27 | 1 | 8 | 1 | 20 | 6 |
| iRes128 | Месяц начала операции 2.2 | <13:5> | 28 | 1 | 8 | 2 | 24 | 6 |

Назад > > Выход

Рис. 3.12. Форма установления соответствия и обмена данными между имитационной и эволюционной моделями планирования

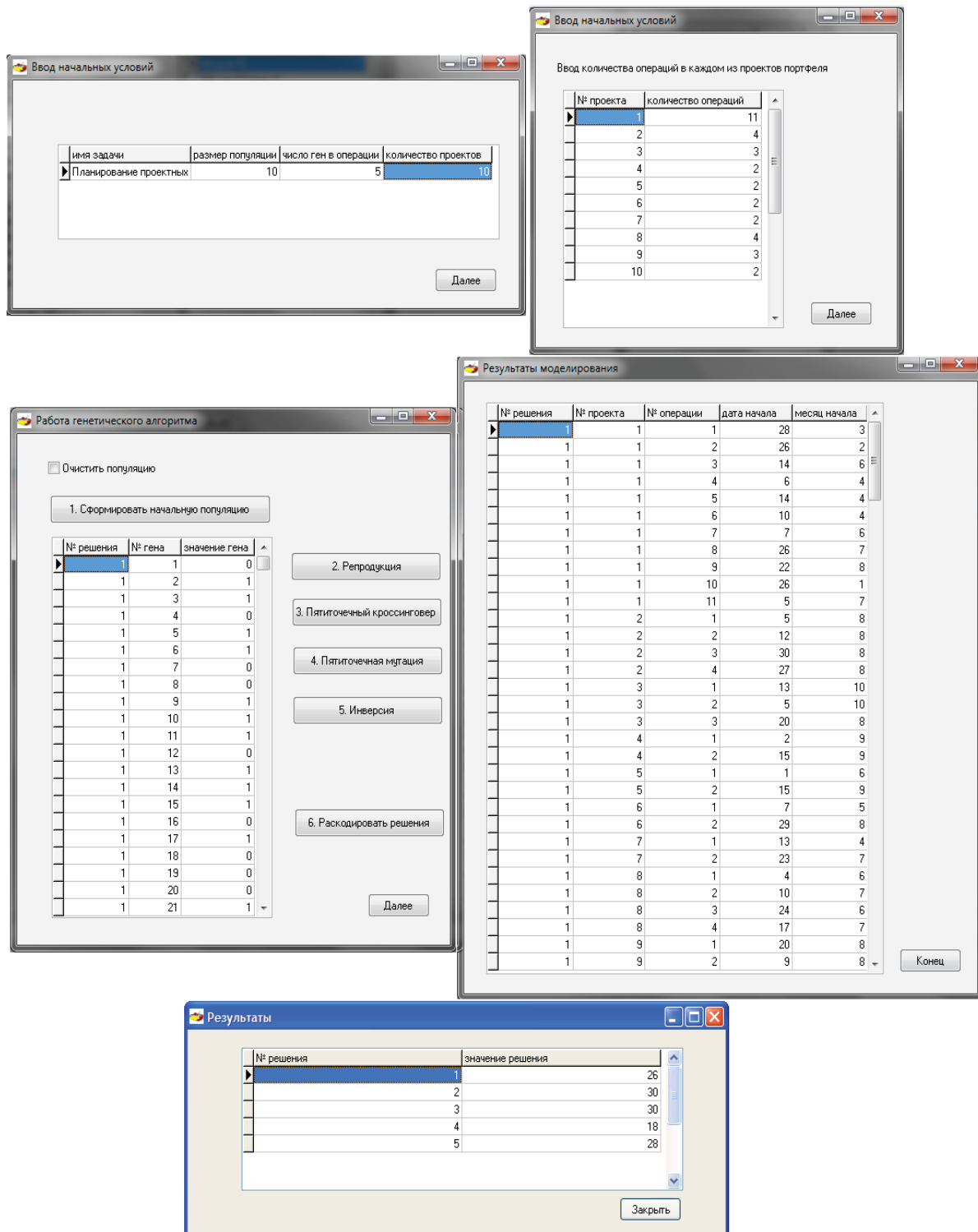


Рис. 3.13. Формы интеллектуального агента (визарда) мультиагентной генетической оптимизации

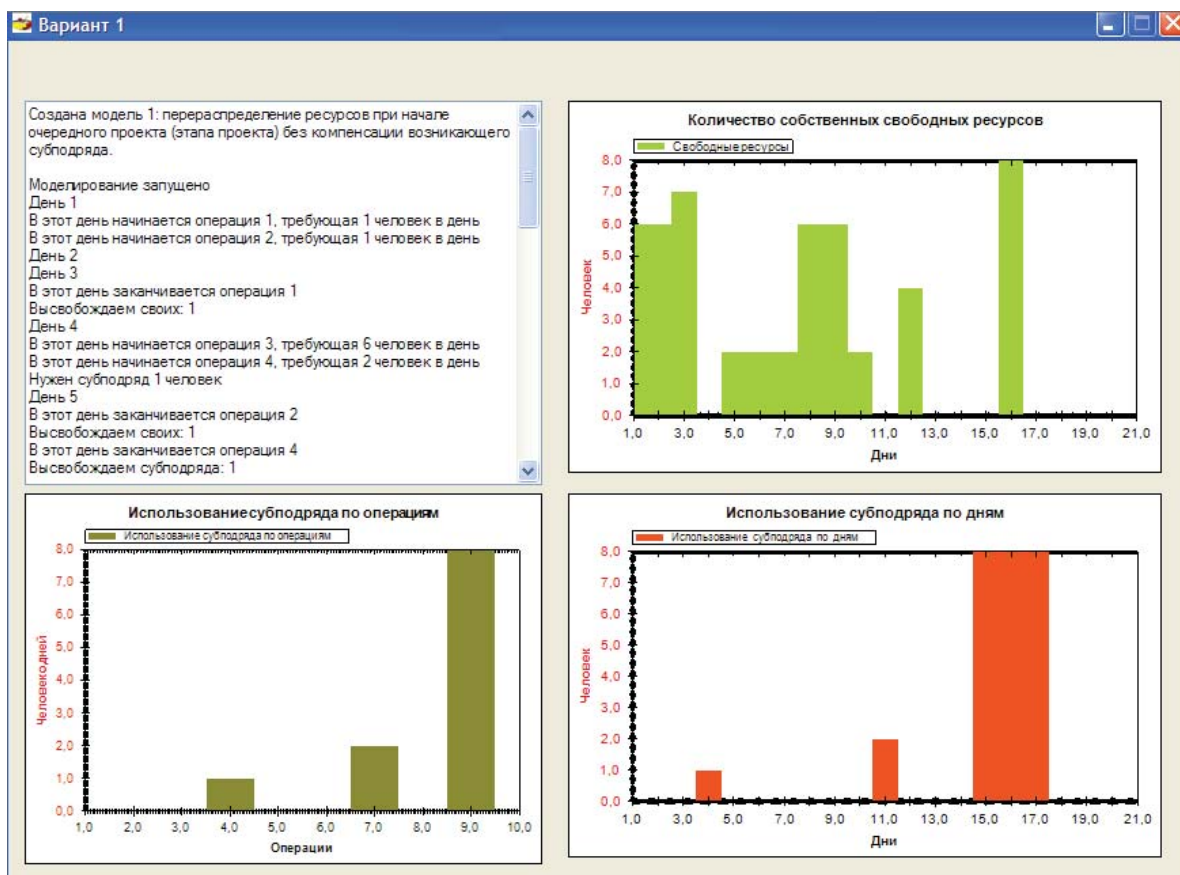


Рис. 3.14. Форма просмотра выходных характеристик исполнения календарного плана

В результате был разработан визард мультиагентной генетической оптимизации, реализованный с использованием инструментов BPsim, MSN, BPsim.SD, Transact-SQL и Microsoft SQL Server.

3.2. Реализация метода МГО в системе выпуска металлургической продукции

3.2.1. Постановка задачи на разработку технологии эволюционного моделирования

Автоматизированная система выпуска металлургической продукции (АС ВМП) представляет собой web-ориентированную систему, предназначенную для слежения, контроля, моделирования, анализа и совершенствования процессов выпуска металлургической продук-

ции. Система АС ВМП разработана совместно с Уральским федеральным университетом. АС ВМП включает следующие компоненты: сервер, обрабатывающий и хранящий большие объемы данных реального времени; web-ориентированные клиентские приложения. Описание системы приведено в работах, подготовленных при участии авторов монографии [127, 128].

АС ВМП в силу специфических требований объекта автоматизации состоит из большого числа модулей. Их совместное взаимодействие позволяет решать задачи наблюдения за состоянием производственных объектов, проверки корректности параметров единиц продукции, моделирования, анализа и выдачи рекомендаций по совершенствованию полного цикла выпуска продукции. АС ВМП состоит из следующих подсистем (см. рисунок 3.15): автоматизированной информационной системы анализа данных (АИС САД) и автоматизированной информационной системы моделирования (АИС МОД). Система АИС САД включает в себя: хранилище данных, модуль конструктор запросов и модуль обмена данными с автоматизированными системами предприятия (ОДАСП). Функционально модуль ОДАСП соответствует классу корпоративной шины данных и предназначен для обмена данными в режиме реального времени с такими информационными системами, как корпоративные информационные системы (КИС), системы управления производством MES и ERP системы, АСУ ТП. Модуль конструктор запросов предоставляет возможность формирования произвольных выборок среди хранимых данных и является инструментом создания нерегламентированных отчетов. Система АИС МОД включает в себя следующие модули, разработанные при участии авторов монографии: модуль создания моделей процессов (СМП) [129], модуль подготовки данных (ПД) [130], модуль оптимизации процессов предприятия (ОПП) [131]. Также АИС МОД включает модуль интеграции моделей. Модуль СМП предоставляет возможность построения моделей МППР с помощью графической нотации МППР, включающей в себя следующие элементы: операция, связь между операциями, агент. Модуль ОПП предназначен для проведения экспериментов с моделью согласно заданному плану экспериментов; формирование плана экспериментов осуществляется с помощью реализованного при участии авторов модуля планирования [132].

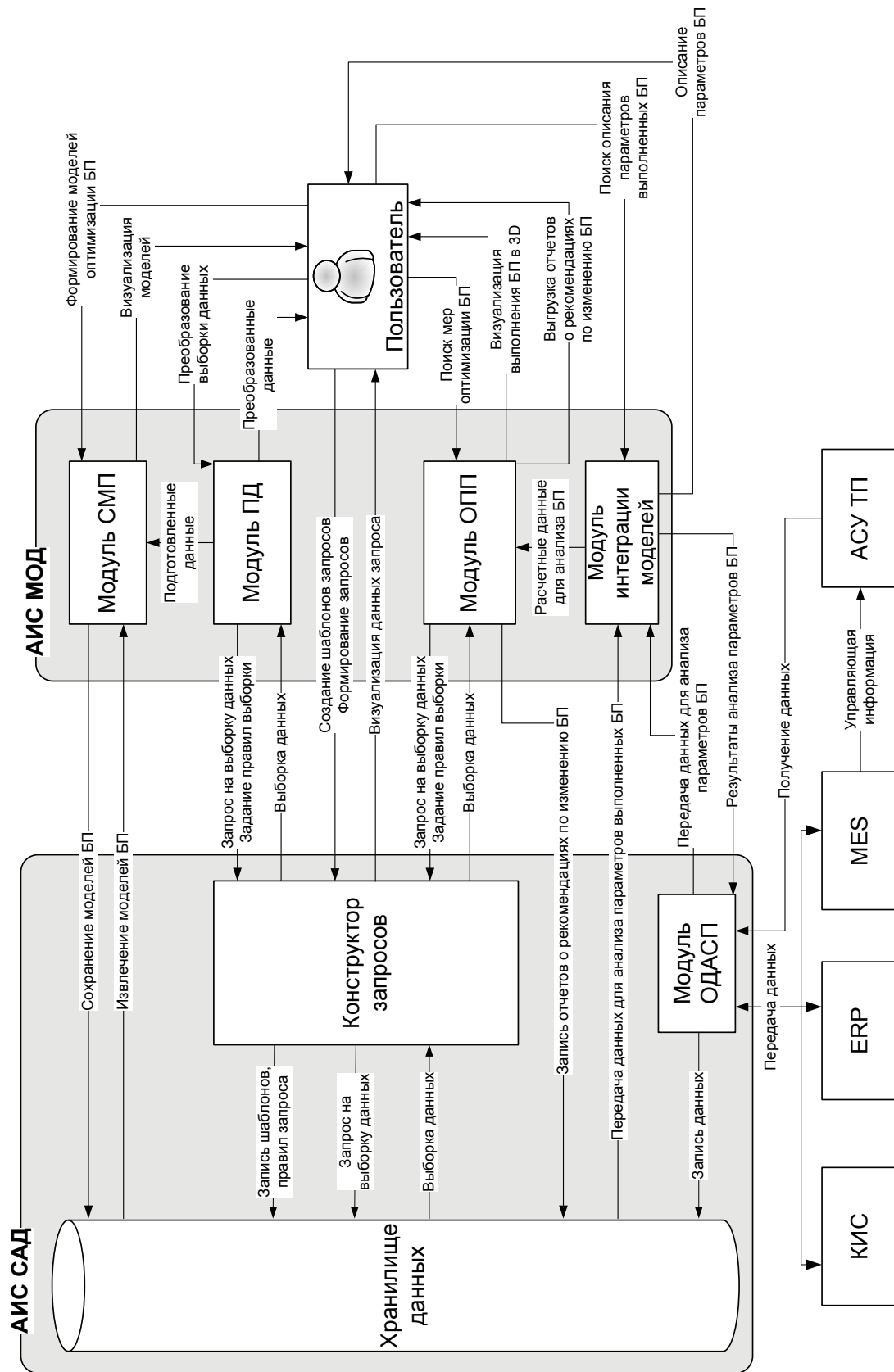


Рис. 3.15. Структура АС ВМП

Для реализации метода мультиагентной генетической оптимизации необходимо в модуле ОПП системы АС ВМП реализовать информационную технологию мультиагентного имитационно-эволюционного моделирования. Для реализации данной технологии необходимо реализовать алгоритм интеграции эволюционного и имитационного моделирования и обеспечить его взаимодействие с алгоритмом проведения экспериментов с моделью согласно заданному плану.

Сформулируем требования, предъявляемые к реализуемой ИТ мультиагентного имитационно-эволюционного моделирования в модуле ОПП системы, АС ВМП и опубликованные авторами в [133].

1. Возможность задания пользователем параметров работы метода МГО: числа хромосом в популяции, числа популяций как признак останова работы метода, вероятностей применения генетических операторов мутации и инверсии.

2. Возможность формирования полнофакторного плана экспериментов, представляющего собой пространство поиска решения задачи планирования бизнес-процессов.

3. Интеграция реализуемой технологии с базой данных модулей СМП и ОПП в части обмена следующей информацией: передачи в алгоритм проведения экспериментов модуля ОПП сформированного с помощью технологии мультиагентного имитационно-эволюционного моделирования плана экспериментов и целевой функции; передачи в модуль СМП найденных с помощью технологии мультиагентного имитационно-эволюционного моделирования оптимальных (эффективных) значений управляемых параметров.

4. Возможность просмотра пошаговой работы метода МГО по окончании его выполнения.

3.2.2. Реализация информационной технологии в модуле оптимизации процессов

Рассмотрим этапы реализации метода МГО в ИТ мультиагентного имитационно-эволюционного моделирования модуля ОПП системы АС ВМП, опубликованные авторами в [134, 135].

Этап 1. Выбор способа кодирования оцениваемого альтернативного решения задачи в особь-хромосому.

Рассмотрим реализуемый способ декодирования хромосомы. Пусть M – число входных управляемых параметров системы, N – число

хромосом в популяции, Q – число генов в хромосоме. Введем следующие индексы: $i \in \{1, \dots, M\}$, $k \in \{1, \dots, N\}$. Будем использовать следующие обозначения: $D_i = [a_i; b_i]$ – диапазон изменения значения управляемого параметра P_i ; $\Delta_i = 0 - a_i$ – смещение диапазона значений параметра P_i ; $D_i' = [a_i + \Delta_i; b_i + \Delta_i]$ – нормированный диапазон изменения значения управляемого параметра P_i ; q_i – количество ген, необходимое для двоичной записи верхней границы нормированного диапазона D_i' изменения значения управляемого параметра P_i ; $\sum q_i = Q$. Пусть текущая популяция состоит из N строк, заполненных 0 и 1: $S = \{S_1, \dots, S_N\}$; $S_k = \{\beta_0^k, \beta_1^k, \dots, \beta_{Q-1}^k\}$, $\beta \in \{0, 1\}$. Рассмотрим реализуемый алгоритм декодирования набора строк S в набор управляемых параметров $P = \{P_{i,k}\}$.

1. $k=1$.

2. Разбиение строки S_k на M подстрок размером q_i каждая $S_k = \{SS_1^k, \dots, SS_M^k\}$, $SS_i^k = \{\lambda_0^{i,k}, \lambda_1^{i,k}, \dots, \lambda_{q_i-1}^{i,k}\}$, где

$$\forall t \in \{0, \dots, q_i - 1\} \quad \lambda_t^{i,k} = \begin{cases} \beta_t^k, & \text{если } i = 1, \\ \beta_{t', t' = t + \sum_{r=1}^{i-1} q_{i-r}}, & \text{если } i \neq 1. \end{cases} \quad (3.1)$$

3. Декодирование каждой подстроки SS_i^k строки S_k в значение параметра $P'_{i,k}$:

$$P'_{i,k} = \sum_{t=0}^{q_i-1} (\lambda_t^{i,k} \cdot 2^t). \quad (3.2)$$

4. Преобразование параметров $P'_{i,k}$ в параметры $P_{i,k}$ по формуле:

$$P_{i,k} = P'_{i,k} - \Delta_i.$$

5. Проверка выполнения условия $a_i \leq P_i \leq b_i$ для всех i . Если условие выполнено, то переход на шаг 7. Если условие не выполнено для некоторых i , то формирование случайным образом новой строки S_k , переход на шаг 2.

6. Если $k < N$, то $k = k + 1$ и переход на шаг 2, иначе переход на шаг 7.

7. Конец декодирования.

Этап 2. Разработка операторов изменений особей-хромосом (генетических операторов).

В результате работы генетических операторов меняется символьная строка, кодирующая решение, следовательно, меняется и решение задачи, представленной данной строкой. Применение генетических

операторов к текущей популяции особей позволяет получить новую популяцию особей. Декодирование особей новой популяции приводит к формированию набора новых решений поставленной задачи. В качестве генетических операторов были использованы стандартные операторы: оператор кроссинговера, оператор мутации и оператор инверсии. Для каждого оператора предполагается задание пользователем начальной вероятности его применения. В ходе работы алгоритма вероятности применения генетических операторов меняются динамически при смене значения параметра АИО.

Этап 3. Определение законов выживания решения (законов селекции или отбора решений-хромосом в следующую популяцию).

В качестве закона отбора решения в следующую популяцию был реализован закон рулетки. Согласно данному закону каждому решению ставится в соответствие вероятность его отбора, связанная с ФП решения (чем выше ФП, тем выше вероятность отбора решения).

Этап 4. Выбор способа генерации начальной популяции и способа останова работы алгоритма.

Генерация начальной популяции реализована случайным образом. Способ останова алгоритма выбран по достижению заданного пользователем числа популяций.

Этап 5. Реализация метода МГО на языке Java.

Интеграция разработанной информационной технологии с модулями СМП и ОПП системы АС ВМП обеспечивается за счет организации единой базы данных модулей и информационной технологии МГО.

Этап 6. Реализация интерфейса взаимодействия пользователя с информационной технологией мультиагентной генетической оптимизации.

Форма пользовательского интерфейса информационной технологии мультиагентной генетической оптимизации в модуле ОПП системы АС ВМП представлена на рисунке 3.16. В результате выполнения эволюционного поиска оптимального (эффективного) решения поставленной задачи формируется файл с подробными результатами работы метода МГО (см. рисунок 3.17).

В результате была разработана ИТ мультиагентного имитационно-эволюционного моделирования в модуле ОПП системы АС ВМП с использованием языка программирования Java и инструмента Oracle Database 11g Enterprise Edition.

Рис. 3.16. Пользовательский интерфейс ИТ МГО в модуле ОПП АС ВМП

| Microsoft Excel - Result_Reports_EM 1.xlsx | | | | | | | | | | |
|--|-----------|------------------|--------------|-------------|--------------------------|------------------------------|-------------|----------------|--|--|
| Введите вопрос | | | | | | | | | | |
| A1 | B | C | D | E | F | G | H | I | | |
| 1 | Популяция | Среднее значение | Максимальное | Минимальное | значение целевой функции | | | | | |
| 2 | Общее | 48,43586135 | 62,34509056 | 32,20527486 | | | | | | |
| 3 | 1 | 46,22975862 | 56,48236416 | 32,35280766 | | | | | | |
| 4 | 2 | 47,20368605 | 57,59850651 | 37,53177629 | | | | | | |
| 5 | 3 | 51,87413939 | 62,34509056 | 32,20527486 | | | | | | |
| 6 | | | | | | | | | | |
| 7 | Популяция | Хромосома | П.ГОО.ИНЖ | П.ГОТС.АДМ | П.ГОТС.ВЕДИНЖ | Средняя нагрузка сотрудников | ХП.ГОТС.АДМ | ХП.ГОТС.ВЕДИНЖ | | |
| 8 | 1 | 1 | 3 | 1 | 1 | 56,48236416 | 1 | 1 | | |
| 9 | 1 | 2 | 4 | 4 | 2 | 32,35280766 | 4 | 2 | | |
| 10 | 1 | 3 | 3 | 3 | 1 | 43,45294839 | 1 | 1 | | |
| 11 | 1 | 4 | 3 | 2 | 1 | 55,40808096 | 1 | 1 | | |
| 12 | 1 | 5 | 3 | 2 | 1 | 50,46643061 | 2 | 1 | | |
| 13 | 1 | 6 | 3 | 1 | 1 | 39,21591992 | 1 | 1 | | |
| 14 | 2 | 1 | 3 | 1 | 1 | 40,80076263 | 1 | 1 | | |
| 15 | 2 | 2 | 3 | 1 | 1 | 43,08071179 | 1 | 1 | | |
| 16 | 2 | 3 | 3 | 1 | 1 | 57,59850651 | 1 | 1 | | |
| 17 | 2 | 4 | 3 | 1 | 1 | 37,53177629 | 1 | 1 | | |
| 18 | 2 | 5 | 3 | 1 | 1 | 57,02653321 | 1 | 1 | | |
| 19 | 2 | 6 | 3 | 1 | 1 | 47,18382587 | 1 | 1 | | |
| 20 | 3 | 1 | 3 | 1 | 1 | 56,58960915 | 1 | 1 | | |
| 21 | 3 | 2 | 3 | 1 | 1 | 57,63028281 | 1 | 1 | | |
| 22 | 3 | 3 | 3 | 1 | 1 | 32,20527486 | 1 | 1 | | |
| 23 | 3 | 4 | 3 | 1 | 1 | 48,84016524 | 1 | 1 | | |
| 24 | 3 | 5 | 3 | 1 | 1 | 62,34509056 | 1 | 1 | | |
| 25 | 3 | 6 | 3 | 1 | 1 | 53,63441373 | 1 | 1 | | |
| 26 | | | | | | | | | | |
| 27 | | | | | | | | | | |
| 28 | | | | | | | | | | |
| 29 | | | | | | | | | | |
| 30 | | | | | | | | | | |

Рис. 3.17. Сформированный файл с результатами работы метода МГО

3.2.3. Тестирование работы технологии имитационно-эволюционного моделирования

Рассмотрим тестирование реализованного в модуле ОПП системы АС ВМП метода МГО на примере решения задачи оптимизации логистических процессов выпуска металлургической продукции (ВМП). Рассматриваемые процессы связаны с движением единиц продукции по агрегатам конвертерного и прокатного производства и дальнейшей их погрузкой со склада готовой продукции в подвижной состав, приходящий раз в сутки.

Задача заключается в определении оптимального (эффективного) соотношения количества вагонов подвижного состава и интенсивности генерации заявок на производство продукции с целью минимизации среднего времени простоя поданных вагонов T перед погрузкой и минимизации объема склада готовой продукции V .

Количество вагонов меняется в пределах от 4 до 20 штук; интенсивность генерации заказов на производство меняется в диапазоне от 1 мин до 15 мин с шагом 1 мин. Время моделирования – 3000 минут.

Для решения данной задачи в модуле создания моделей процессов (СМП) АИС МОД была разработана имитационная модель процессов ВМП, описанная авторами в [98].

Данная модель была модифицирована с целью расчета на выходе модели характеристик T и V . В результате был описан выходной параметр «Выход модели» Out , рассчитываемый следующим образом (с учетом максимизации данного параметра):

$$Out = \text{Round}(1000000 / (T + 10 \cdot V)).$$

Структура модели приведена на рисунке 3.18.

Информация, введенная пользователем для работы метода МГО, и результат работы метода, формируемый модулем ОПП системы АИС МОД, представлены на рисунке 3.19.

В результате работы метода МГО в составе модуля ОПП было получено следующее решение: для минимизации среднего времени простоя поданных вагонов T перед погрузкой и минимизации объема склада готовой продукции V необходимо обеспечить интенсивность генерации заказов на производство с периодичностью раз в 15 минут и количество вагонов подвижного состава в количестве 14 штук.

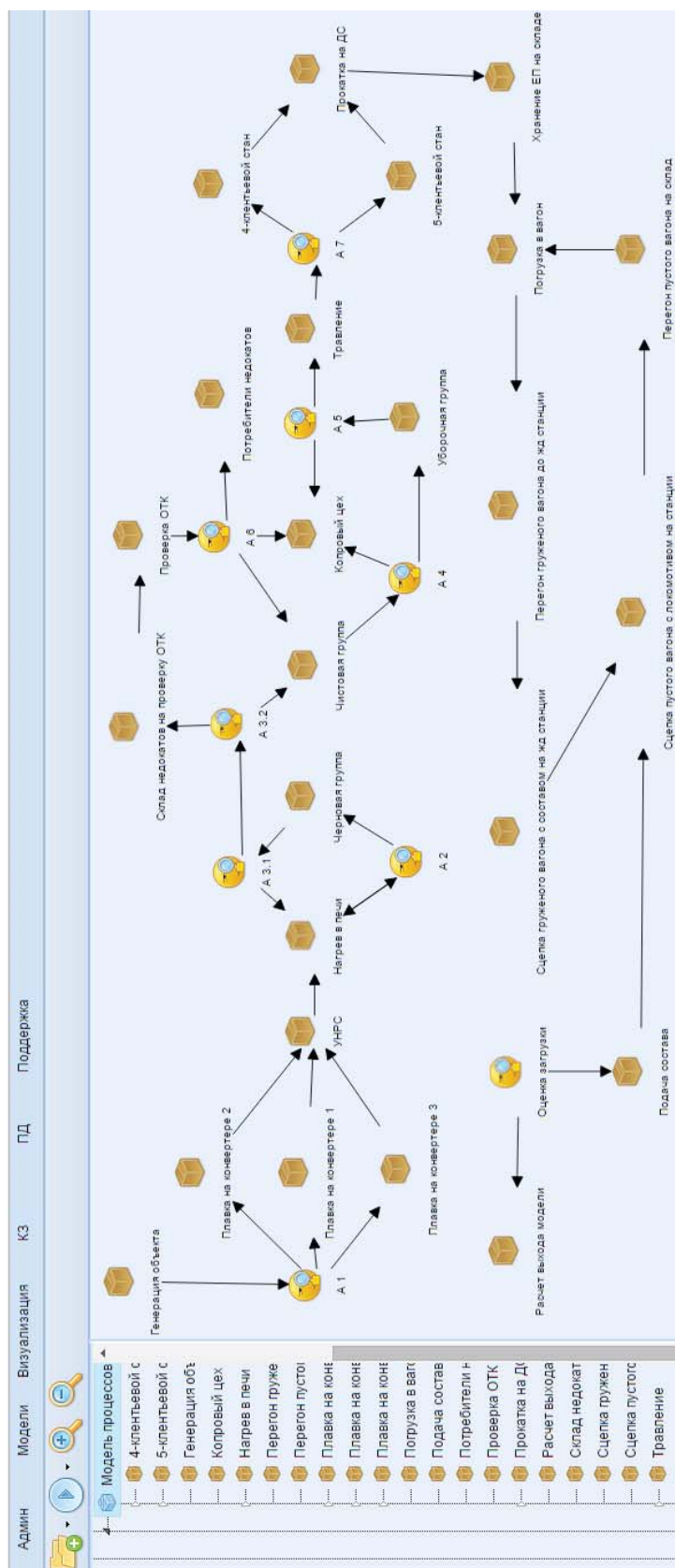


Рис. 3.18. Структура имитационной модели в модуле СМР АИС МОД

Рис. 3.19. Интерфейс информационной технологии МГО в модуле ОПШ

Данное решение соответствует следующим значениям выходных характеристик решаемой задачи: $T=699$ мин, $V=10$ шт.

По окончании работы метода МГО был сформирован файл с расширением .xlsx, содержащий подробную информацию о ходе решения оптимизационной задачи. На основании анализа данного файла были построены зависимости максимального, минимального и среднего значений ФП хромосом (функции *Out*) от номера популяции, представленные на рисунке 3.20. Как следует из рисунка, с ростом номера популяции среднее значение ФП имеет тенденцию к возрастанию, максимальное значение ФП возрастает незначительно, а минимальное значение ФП подвержено сильным колебаниям. Последнее обстоятельство обеспечивает новую популяцию генетическим разнообразием для поиска новых решений и выхода из локального оптимума.

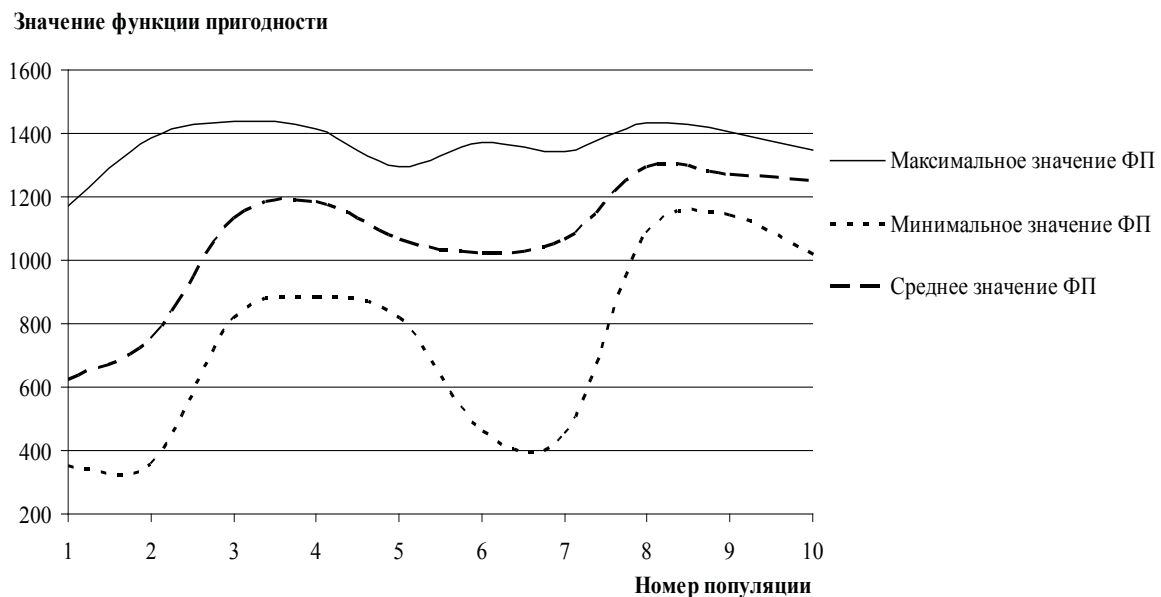


Рис. 3.20. Зависимость значений ФП от номера популяции

Работа метода МГО была проанализирована при смене числа хромосом в популяции и смене числа поколений (предельного числа популяций). Была проанализирована зависимость процента решений, неудовлетворяющих ограничению на принадлежность управляемого параметра P_i решению диапазону D_i изменения значений данного параметра (рис. 3.21, левый график).

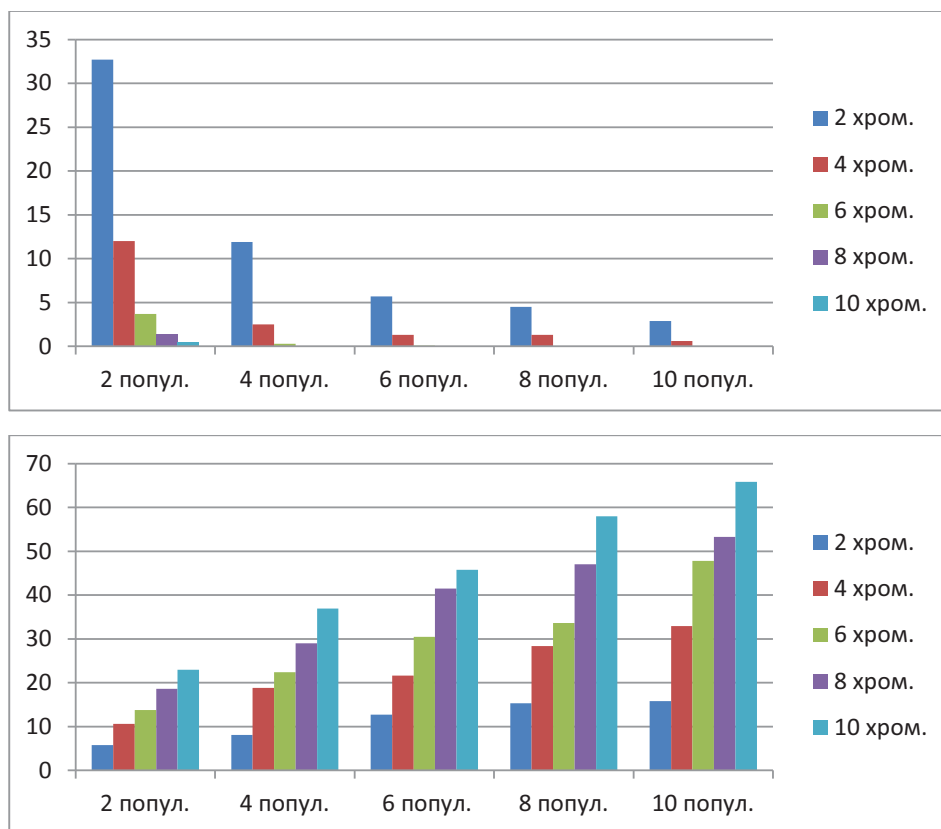


Рис. 3.21. Зависимость процента неудовлетворяющих ограничениям решений (слева) и процента решений с высокой ФП (справа) от числа поколений и числа хромосом в поколении

На правом графике рисунка 3.21 представлена зависимость процента решений с высокой ФП (отличной от найденной максимальной ФП не более чем на 5%).

Как следует из анализа графиков, приведенных на рисунке 3.21, увеличение числа поколений снижает процент неудовлетворяющих ограничениям решений, что связано с закреплением в каждом последующем поколении удовлетворяющих ограничениям решений. Зависимость процента неудовлетворяющих ограничениям решений от роста числа хромосом в поколении незначительна при применении числа хромосом не менее 6. Одновременное увеличение числа поколений и числа хромосом в поколениях повышает процент решений с высокой ФП, что связано с повышением разнообразия генетического материала.

Таким образом, можно рекомендовать пользователю следующие настройки работы метода МГО: применение числа хромосом в поколении в размере не менее 6 хромосом и задание останова работы алгоритма при смене не менее чем 6 поколений.

3.3. Выводы

1. На основании теоретических результатов, полученных во второй главе, были разработаны:

1.1. Информационная технология планирования проектных работ на основе продуктов семейства BPsim, включающая:

- интеллектуального агента (визарда) мультиагентной генетической оптимизации;
- интерфейсы программного комплекса МГО задачи планирования проектных работ, ориентированные на конечного непрограммирующего пользователя;
- программное, информационное, алгоритмическое, методическое обеспечение программного комплекса планирования проектных работ.

1.2. Информационная технология мультиагентного имитационно-эволюционного моделирования в модуле ОПП системы АС ВМП.

2. Разработанная информационная технология планирования проектных работ, построенная на основе продуктов семейства BPsim, обладает полным перечнем функциональных возможностей, предъявляемых к системе планирования проектных работ, и отличается:

2.1. Гибридной архитектурой программной мультиагентной системы, которая позволяет строить сложные модели планирования, состоящие из 2-х взаимодействующих между собой элементов: динамической модели МППР и блока мультиагентной генетической оптимизации управляющих параметров модели МППР.

2.2. Поддержкой разработки пользователем собственного способа решения задачи планирования с помощью ГА на основе описания кодирования фенотипа особи в генотип с использованием языка запросов (Transact SQL) и диаграмм решений на основе языка UML.

2.3. Возможностью анализа альтернативных решений (календарных планов работ).

2.4. Поддержкой русского языка.

3. Разработанная технология мультиагентного имитационно-эволюционного моделирования в модуле ОПП системы АС ВМП отличается:

3.1. Возможностью формирования плана эволюционного эксперимента по поиску расписания с наименьшими затратами на привлечение субподрядных ресурсов при наличии временных ограничений.

3.2. Интеграцией плана эволюционного эксперимента модуля ОПП и входных и выходных параметров модели МППР модуля СМП системы АС ВМП.

3.3. Поддержкой задания пользователем параметров работы генетического алгоритма.

3.4. Формированием пошаговых результатов работы метода МГО по окончании эволюционного поиска.

3.5. Поддержкой русского языка.

4. ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА МУЛЬТИАГЕНТНОЙ ГЕНЕТИЧЕСКОЙ ОПТИМИЗАЦИИ

4.1. Применение метода МГО к задаче планирования ЗАО «Телесистемы»

4.1.1. Разработка мультиагентной имитационной модели исполнения работ

Рассмотрим проектную деятельность предприятия ЗАО «Телесистемы» (www.telesystems.info), реализующего портфель проектов с помощью следующих отделов: проектного отдела (ПО), состоящего из 6 человек, производственного отдела (ПрО), состоящего из 8 человек, и отдела материально-технического обеспечения (ОМТО), состоящего из 1 человека.

Формализуем процесс выполнения проектных работ с помощью модели МППР. В качестве агентов МППР используем реактивных агентов, в основе которых лежат продукции вида «Если-То», позволяющие аккумулировать опыт экспертов в предметной области по диагностированию внешних ситуаций и выработке решений. Кроме того, реактивные агенты применяются для описания отдельных элементов модели МППР с целью обеспечения простоты программной реализации модели.

Разработка модели исполнения портфеля проектов выполнялась в СДМС BPsim.MAS. Разрабатываемая имитационная модель предназначена для оценки за календарный период загрузки трудовых ресурсов предприятия (отделов), объема и стоимости привлекаемых субподрядных ресурсов, потребления складированных ресурсов, а также для планирования сроков начала работ по проектам с целью уменьшения стоимости привлекаемого субподряда.

Входной информацией для модели МППР является анализируемый портфель проектов, при этом отдельные проекты портфеля представлены набором следующих параметров:

- 1) название проекта;
- 2) даты начала и окончания проекта;

- 3) перечень операций проектных и производственных работ проекта;
- 4) длительность проектных и производственных работ (с разбивкой на длительности отдельных операций работ);
- 5) трудозатраты на проектные и производственные работы в человеко-днях (с разбивкой на трудозатраты по отдельным операциям работ).

На выходе модели необходимо оценить функционирование процессов исполнения портфеля проектов за требуемый календарный период по следующим параметрам:

- 1) текущая загрузка отделов предприятия в процентах;
- 2) текущее количество свободных людей отделов (простой отделов);
- 3) общий простой отделов за период;
- 4) количество человеко-дней субподряда на каждый проект с разбивкой на операции проекта;
- 5) суммарное количество человеко-дней субподряда на каждый проект и на портфель проектов;
- 6) стоимость человеко-дней субподряда по портфелю проектов.

В результате обследования предметной области (деятельности предприятия ЗАО «Телесистемы») были описаны процессы исполнения работ по отдельному проекту с использованием графической нотации IDEF0 и собрана входная информация по пяти типам проектов, реализованным за полгода (см. таблицу 4.1).

В ходе разработки ИМ были описаны следующие узлы:

- 1) операции, отражающие протяженные во времени работы по исполнению портфеля проектов и использующие для выполнения нескладируемые (трудовые) ресурсы и складируемые ресурсы (монтажные объекты: датчики контроля, счетчики, расходомеры, тепловычислители и т.д.);
- 2) реактивные агенты (РА), предназначенные для распределения нескладируемых ресурсов (собственных и субподрядных) по работам;
- 3) реактивные агенты поставок складируемых ресурсов.

Распределение ресурсов между несколькими параллельными операциями осуществляется в порядке, определяемом приоритетами выполнения операций. Значения приоритетов устанавливаются путем экспертной оценки ЛПР.

Таблица 4.1

Входные данные модели МППР выполнения пяти типов проектов ЗАО “Телесистемы”

| № | Операция | День начала | Месяц начала | Длитель- ность, дни | Трудо- заплаты, человеко-дни |
|------------------|--|----------------|-----------------|------------------------|------------------------------------|
| Проект №1 | | | | | |
| 1 | Проектные работы | | | | |
| 1.1 | Предпроектное обследование | 17 | 3 | 16 | 28 |
| 1.2 | Разработка технического задания (ТЗ) и технорабочего проекта (ТРП) | 10 | 3 | 76 | 71 |
| 1.4 | Экспертиза ТЗ и ТРП | 28 | 6 | 66 | - |
| 2 | Производственные работы | | | | |
| 2.1 | Поставка оборудования | 5 | 4 | 68 | 18 |
| 2.2 | Монтажные и наладочные работы | 20 | 4 | 163 | 95 |
| 2.6 | Разработка технической и эксплуатационной документации | 29 | 3 | 81 | 33 |
| 2.7 | Разработка методики выполнения измерений | 11 | 6 | 77 | 10 |
| 2.8 | Разработка программы и методики испытаний | 2 | 8 | 110 | 7 |
| 2.9 | Обучение персонала Заказчика | 12 | 8 | 20 | 13 |
| 2.10 | Сдача работ | 27 | 1 | 16 | 14 |
| 2.11 | Сертификация в сторонних организациях | 1 | 7 | 152 | - |

| № | Операция | День начала | Месяц начала | Длительность, дни | Трудовые затраты, человеко-дни |
|------------------|--|-------------|--------------|-------------------|--------------------------------|
| Проект №2 | | | | | |
| 2 | Производственные работы | | | | |
| 2.3 | Монтажные и наладочные работы (телемеханика) | 18 | 8 | 43 | 110 |
| 2.4 | Монтажные и наладочные работы (автоматизированная система контроля и учета энергоресурсов (АСКУЭ)) | 25 | 8 | 17 | 52 |
| 2.5 | Монтажные и наладочные работы (средства связи) | 1 | 9 | 8 | 54 |
| 2.10 | Сдача работ | 2 | 9 | 29 | 35 |
| Проект №3 | | | | | |
| 2 | Производственные работы | | | | |
| 2.3 | Монтажные и наладочные работы (телемеханика) | 11 | 10 | 6 | 16 |
| 2.4 | Монтажные и наладочные работы (АСКУЭ) | 11 | 10 | 6 | 12 |
| 2.6 | Разработка технической документации | 30 | 8 | 17 | 10 |
| Проект №4 | | | | | |
| 2 | Производственные работы | | | | |
| 2.3 | Монтажные и наладочные работы (телемеханика) | 6 | 9 | 148 | 218 |
| 2.5 | Монтажные и наладочные работы (средства связи) | 6 | 9 | 148 | 110 |
| Проект №5 | | | | | |
| 1 | Проектные работы | | | | |
| 1.2 | Разработка ТЗ и ТРП | 1 | 6 | 187 | 139 |
| 1.3 | Разработка ТЗ и ТРП по параллельному объекту | 30 | 9 | 104 | 139 |

Каждой операции модели поставлена в соответствие заявка z , набор атрибутов которой хранит информацию об операции: номер проекта z_n , день начала операции z_d , месяц начала операции z_m , длительность операции z_l , трудозатраты в человеко-днях на операцию z_w , средние трудозатраты на операцию в человеко-часах в день z_h , которые рассчитываются по формуле: $z_h = z_w \cdot 8 / z_l$. На рисунке 4.1 представлена реализованная в модели схема параллельного распределения заявок.

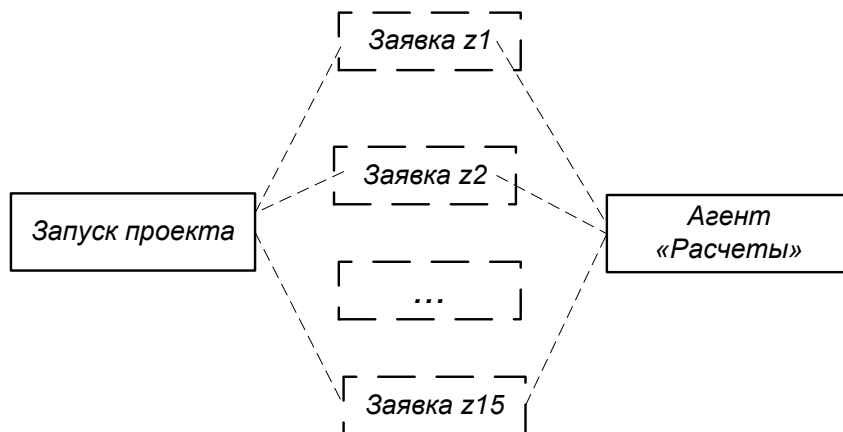


Рис. 4.1. Схема параллельного распределения заявок

Вид модели МППР выполнения работ представлен на рисунке 4.2 в графической нотации системы BPsim.MAS с декомпозицией проектных и производственных работ. РА в модели делятся на два вида: агентов выполнения и агентов распределения. Агенты выполнения при захвате заявки (начале выполнения операции) выполняют следующие функции: анализ объема свободных нескладируемых ресурсов предприятия и принятие решения о привлечении субподряда; уменьшение объема свободных ресурсов (захват ресурсов) и передача заявки операции (при отсутствии субподряда) или агенту распределения (при субподряде).

Агент распределения выполняет следующие функции:

- 1) ежедневный анализ объема свободных нескладируемых ресурсов, необходимых для покрытия субподрядных работ;
- 2) захват заявки на срок, в течение которого либо операция заканчивается, либо высвобождаются ресурсы для покрытия субподряда;
- 3) в случае высвобождения достаточного объема ресурса прекращение субподрядных работ, уменьшение объема свободных ресурсов предприятия (захват ресурсов) и передача заявки операции.

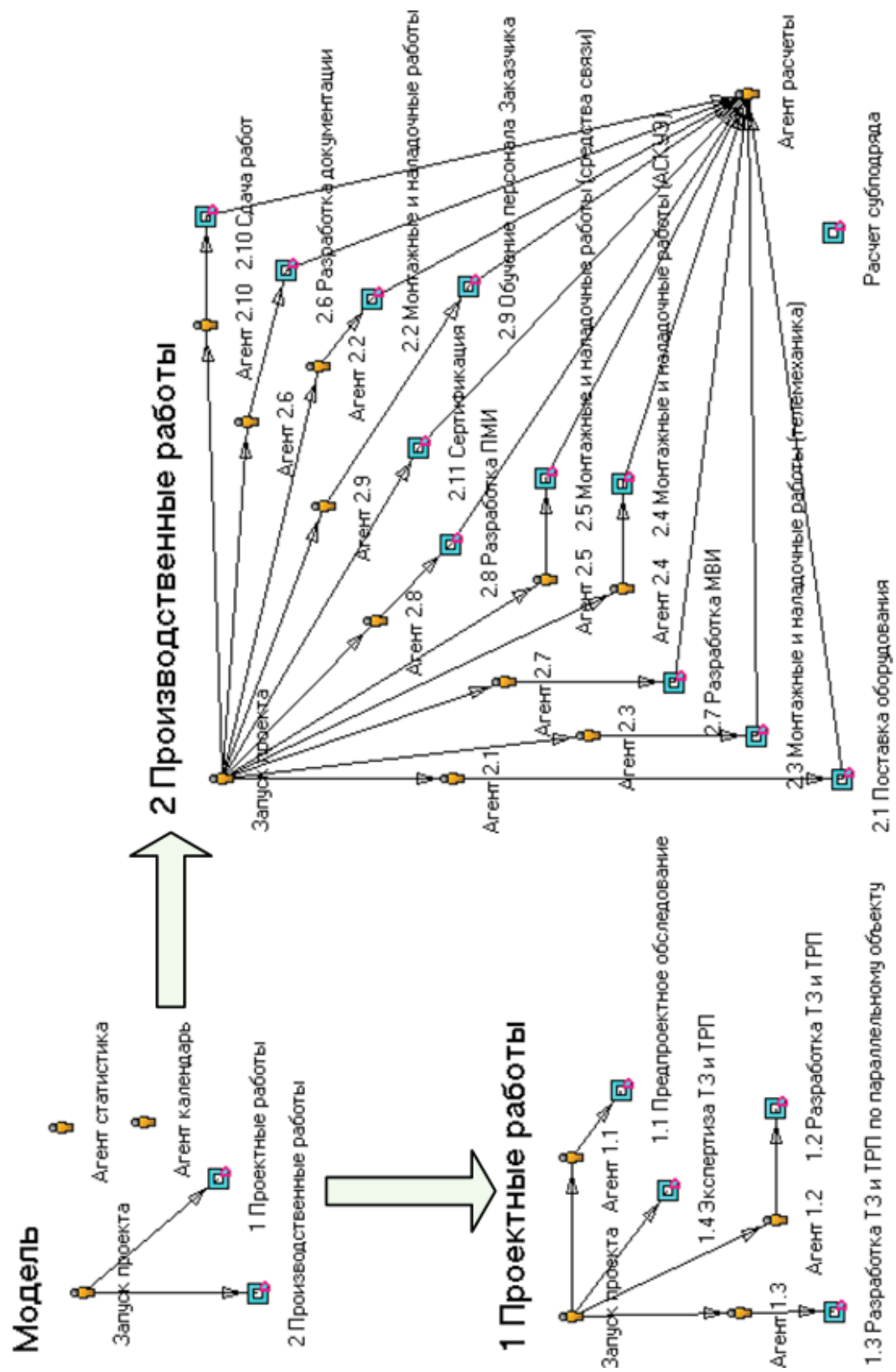


Рис. 4.2. Структура модели выполнения работ в нотации МППР

Узел-операция захватывает заявку до срока окончания выполнения работ по операции, при наступлении которого объем свободных ресурсов предприятия увеличивается (высвобождается) и заявка передается агенту, формирующему статистику выполнения операции.

Проведем моделирование 5 разных типов проектов, входная информация по которым была собрана в ходе обследования предметной области. Сопоставим проведение экспериментов с данной моделью с *вариантом А моделирования*. В результате моделирования варианта А были получены следующие данные:

1) общий простой отделов за полгода при проигрывании варианта 1 составил 69,67% для ПО и 76,82% для ПрО;

2) при суммарном субподряде на портфель проектов в количестве 4,25 человеко-дней необходимо затратить для обеспечения субподрядных работ сумму в размере 35 352 рубля с учетом стоимости одного человеко-дня по каждой операции всех проектов портфеля.

Полученные результаты эксперимента с моделью согласуются с данными, выявленными в ходе исследования статистики работы предприятия.

4.1.2. Обоснование адекватности мультиагентной имитационной модели

Поставим задачу календарного планирования работ в ЗАО «Теле-системы» по портфелю, состоящему из 10 проектов. Входные статистические данные, представляющие собой календарный план, составленный ЛПР, представлен на рисунке 4.3 в виде экземпляра класса «Начальные условия» ИА МГО.

Проведем исследование адекватности двух моделей процессов исполнения работ по портфелю из 10 проектов, разработанных в системе BPsim.MAS: имитационной модели без агентов и мультиагентной модели. Адекватность будем оценивать с помощью критерия Стюдента путем проверки гипотезы о близости средних значений выходных характеристик модели «суммарный объем субподрядных работ» и «суммарный простой собственных отделов» известным статистическим значениям данных характеристик при протекании реальных процессов.

Начальные условия

Свойства

| | № проекта | № операции | день начала | месяц начала |
|----|-----------|------------|-------------|--------------|
| 1 | 1 | 1 | 17 | 3 |
| 2 | 1 | 2 | 10 | 3 |
| 3 | 1 | 3 | 28 | 6 |
| 4 | 1 | 4 | 5 | 4 |
| 5 | 1 | 5 | 20 | 4 |
| 6 | 1 | 6 | 29 | 3 |
| 7 | 1 | 7 | 11 | 6 |
| 8 | 1 | 8 | 2 | 8 |
| 9 | 1 | 9 | 12 | 8 |
| 10 | 1 | 10 | 27 | 1 |
| 11 | 1 | 11 | 1 | 7 |
| 12 | 2 | 1 | 18 | 8 |
| 13 | 2 | 2 | 25 | 8 |
| 14 | 2 | 3 | 1 | 9 |
| 15 | 2 | 4 | 2 | 9 |
| 16 | 3 | 1 | 11 | 10 |
| 17 | 3 | 2 | 11 | 10 |
| 18 | 3 | 3 | 30 | 8 |
| 19 | 4 | 1 | 6 | 9 |
| 20 | 4 | 2 | 6 | 9 |
| 21 | 5 | 1 | 1 | 6 |
| 22 | 5 | 2 | 30 | 9 |
| 23 | 6 | 1 | 1 | 5 |
| 24 | 6 | 2 | 30 | 8 |
| 25 | 7 | 1 | 1 | 4 |
| 26 | 7 | 2 | 30 | 7 |
| 27 | 8 | 1 | 18 | 6 |
| 28 | 8 | 2 | 25 | 6 |
| 29 | 8 | 3 | 1 | 7 |
| 30 | 8 | 4 | 2 | 7 |
| 31 | 9 | 1 | 11 | 8 |
| 32 | 9 | 2 | 11 | 8 |
| 33 | 9 | 3 | 30 | 6 |
| 34 | 10 | 1 | 6 | 7 |
| 35 | 10 | 2 | 6 | 7 |

Добавить Удалить

Рис. 4.3. Начальный календарный план портфеля из 10 проектов

Рассмотрим гипотезу H_0 о равенстве математических ожиданий двух выборок: выборки y_1 реальных статистических значений выходной характеристики с объемом выборки n_1 и выборки y_2 моделируемых значений данной характеристики с объемом выборки n_2 при неизвестных и неравных дисперсиях. При неравных объемах выборок $n_1 \neq n_2$ статистика критерия Стьюдента имеет вид [81]:

$$t = (\bar{y}_1 - \bar{y}_2) / \sqrt{s_1^2/n_1 + s_2^2/n_2}, \quad (4.1)$$

где $\bar{y}_i = 1/n_i \cdot \sum_{j=1}^{n_i} y_{ij}$, $s_i^2 = 1/(n_i - 1) \cdot \sum_{j=1}^{n_i} (y_{ij} - \bar{y}_i)^2$, $i = 1, 2$.

Как показано в [81], при $n_1 + n_2 > 200$ распределение Стьюдента практически не отличается от стандартного нормального закона, следовательно, при справедливости гипотезы H_0 статистика (4.1) подчиняется t_v -распределению Стьюдента с числом степеней свободы [82]:

$$v = (s_1^2/n_1 + s_2^2/n_2)^2 / \left[\frac{(s_1^2/n_1)^2}{n_1 - 1} + \frac{(s_2^2/n_2)^2}{n_2 - 1} \right]. \quad (4.2)$$

Оценим адекватность разработанной имитационной модели без агентов, для чего последовательно проанализируем две рассматриваемые выходные характеристики модели: «суммарный объем субподрядных работ» и «суммарный простой собственных отделов».

Рассмотрим характеристику «суммарный объем субподрядных работ». Выборка y_1 реальных статистических значений данной характеристики с объемом $n_1 = 2$ имеет математическое ожидание $\bar{y}_1 = 43,5$ человеко-дня и дисперсию $s_1^2 = 0,5$.

Проведем серию из 200 экспериментов с имитационной моделью без агентов и сформируем выборку y_2 с объемом $n_2 = 200$, математическим ожиданием $\bar{y}_2 = 45,224$ человеко-дня и дисперсией $s_2^2 = 0,065$. Пример значения выходной характеристики для одного из экспериментов с имитационной моделью без агентов приведен на рисунке 4.4.

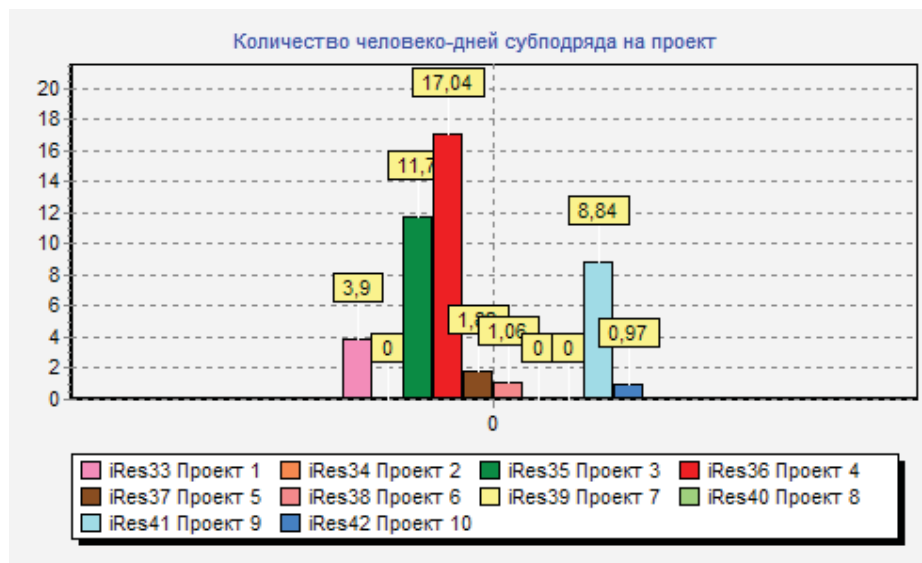


Рис. 4.4. Значения объема субподряда по проектам портфеля для одного из экспериментов с имитационной моделью без агентов

Рассчитаем значение статистики критерия Стьюдента $t = -3,486$ и число степеней свободы $\nu = 1,0026$. Для рассчитанного числа степеней свободы и уровня значимости $\alpha = 0,05$ табличное значение $t_{\nu} = 3,8$. Поскольку для рассматриваемой имитационной модели без агентов неравенство $|t| \leq t_{\nu}$ выполняется ($3,486 < 3,8$), следовательно, гипотеза H_0 о близости средних значений отклика «суммарный объем субподрядных работ» имитационной модели без агентов и рассматриваемой системы принимается.

Проведем серию из 200 экспериментов с мультиагентной моделью исполнения работ по портфелю проектов и сформируем выборку y_2 с объемом $n_2 = 200$, математическим ожиданием $\bar{y}_2 = 43,884$ человеко-дня и дисперсией $s_2^2 = 0,019$. Пример значения выходной характеристики для одного из экспериментов с мультиагентной моделью приведен на рисунке 4.5. Рассчитаем значение статистики критерия Стьюдента и число степеней свободы: $t = 0,768$; $\nu = 1,0008$. Для рассчитанного числа степеней свободы и уровня значимости $\alpha = 0,05$ табличное значение $t_{\nu} = 3,8$. Поскольку для мультиагентной модели неравенство $|t| \leq t_{\nu}$ выполняется ($0,768 < 3,8$), следовательно, гипотеза H_0 о близости средних значений отклика «суммарный объем субподрядных работ» мультиагентной модели и рассматриваемой системы принимается.

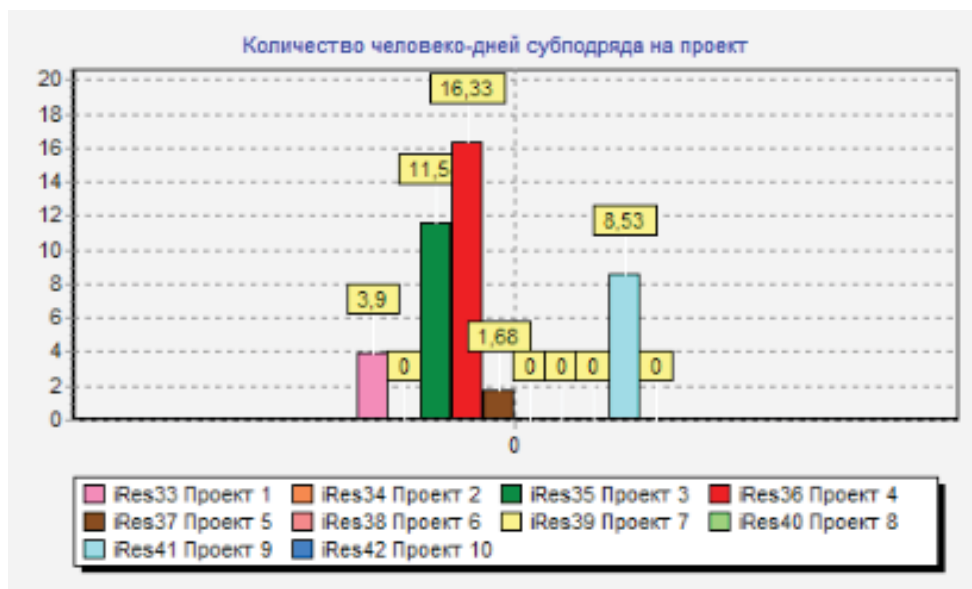


Рис. 4.5. Значения объема субподряда по проектам портфеля для одного из экспериментов с мультиагентной моделью

Рассмотрим характеристику «суммарный простой собственных отделов». Выборка y_1 реальных статистических значений данной характеристики с объемом $n_1 = 2$ имеет математическое ожидание $\bar{y}_1 = 58,25\%$ и дисперсию $s_1^2 = 0,045$.

Проведем серию из 200 экспериментов с имитационной моделью без агентов и сформируем выборку y_2 с объемом $n_2 = 200$, математическим ожиданием $\bar{y}_2 = 58,7$ процента и дисперсией $s_2^2 = 0,028$. Рассчитаем значение статистики критерия Стьюдента и число степеней свободы: $t = -2,99$, $\nu = 1,012$. Для рассчитанного числа степеней свободы и уровня значимости $\alpha = 0,05$ табличное значение $t_\nu = 3,8$. Поскольку для рассматриваемой мультиагентной модели неравенство $|t| \leq t_\nu$ выполняется ($2,99 < 3,8$), следовательно, гипотеза H_0 о близости средних значений отклика «суммарный простой собственных отделов» имитационной модели без агентов и рассматриваемой системы принимается.

Проведем серию из 200 экспериментов с мультиагентной моделью исполнения работ по портфелю проектов и сформируем выборку y_2 с объемом $n_2 = 200$, математическим ожиданием $\bar{y}_2 = 58,14$ процента и дисперсией $s_2^2 = 0,016$. Рассчитаем значение статистики критерия Стьюдента и число степеней свободы: $t = 0,732$, $\nu = 1,0071$. Для рассчитанного числа степеней свободы и уровня значимости $\alpha = 0,05$ табличное значение $t_\nu = 3,8$. Поскольку для рассматриваемой мультиагентной модели неравенство $|t| \leq t_\nu$ выполняется ($0,732 < 3,8$), следовательно, гипотеза H_0 о близости средних значений отклика «суммарный простой собственных отделов» мультиагентной модели и рассматриваемой системы принимается.

Таким образом, гипотезы о близости средних значений двух анализируемых характеристик (откликов) имитационной модели без агентов и рассматриваемых процессов принимаются. Аналогичное заключение получено для мультиагентной модели. Гипотезы о близости средних значений двух анализируемых характеристик (откликов) мультиагентной модели и рассматриваемых процессов принимаются. **Разработанная имитационная модель без агентов является адекватной исследуемым процессам исполнения работ по портфелю проектов. Разработанная мультиагентная модель также является адекватной исследуемым процессам.**

Как показано в разделе 2.2, при применении ИМ без агентов накапливается ошибка, связанная с привлечением дополнительных субподрядных ресурсов, что влечет увеличение оценки затрат на субподряд. При использовании ИМ с агентами подобная ошибка отсутствует, следовательно, мультиагентная модель является более адекватной исследуемым процессам исполнения работ с учетом ограниченных ресурсов. Таким образом, для проведения дальнейших исследований выбрана мультиагентная модель процессов исполнения работ по портфелю проектов ЗАО «Телесистемы», разработанная в системе BPsim.MAS.

Оценим число экспериментов с моделью исследуемых процессов при решении поставленной задачи планирования с помощью разработанных методов: эвристико-имитационного (ЭИ) метода, описанного в разделе 2.2, и метода МГО, описанного в разделе 2.3. Для ЭИ метода число итераций определяется как произведение $n \cdot N$, где n – параметр алгоритма, N – общее число всех операций. Для рассматриваемой задачи календарного планирования в ЗАО «Телесистемы» $N = 35$, $n = 2$. Таким образом, число экспериментов с моделью при работе ЭИ метода составило $N_{\text{эксп}} = 70$.

При решении задачи планирования с помощью метода МГО число экспериментов оценивается произведением параметров работы ГА: числа хромосом на число поколений хромосом. Для решения задачи планирования в ЗАО «Телесистемы» были использованы следующие значения параметров: число хромосом – 10, число поколений – 10. Таким образом, число экспериментов с моделью при применении метода МГО составило $N_{\text{эксп}} = 100$.

Оценка числа экспериментов с моделью при применении методов теории планирования эксперимента (ПФЭ и ДФЭ) приведена в разделе 1.4.

Результаты оценки времени решения задачи календарного планирования проектных работ разработанными методами ЭИ и МГО в сравнении с методами теории планирования экспериментов, представлены в таблице 4.2.

Как следует из таблицы, преимуществом с точки зрения времени поиска решения обладает ЭИ метод. В то же время метод МГО осуществляет поиск решения за приемлемое время, поскольку оценка верхней границы времени принятия решения при планировании работ $T_{\text{прин_реш}}$ составляет 1 час.

Т а б л и ц а 4.2

Оценка времени решения задачи планирования
методами теории планирования экспериментов и разработанными методами

| Метод решения задачи планирования | Оценка числа экспериментов с моделью, $N_{\text{эксп}}$ | Оценка времени одного эксперимента $T_{\text{эксп}}$, мин | Оценка времени решения задачи $N_{\text{эксп}} \cdot T_{\text{эксп}}$, мин |
|---|---|--|---|
| Метод ПФЭ | 2^{35} | 0,25 | 10^7 |
| Метод ДФЭ | 2^{10} | 0,25 | 512 ($\approx 8,5$ ч) |
| Метод МГО | 100 | 0,25 | 25 |
| ЭИ метод | 70 | 0,25 | 17,5 |

Методы теории планирования экспериментов неприменимы для решения поставленной задачи планирования проектных работ для ЗАО «Телесистемы» в силу ограниченности машинного ресурса и превышения допустимого времени принятия решения.

В дальнейшем будем рассматривать применение ЭИ метода и метода МГО к решению поставленной задачи планирования.

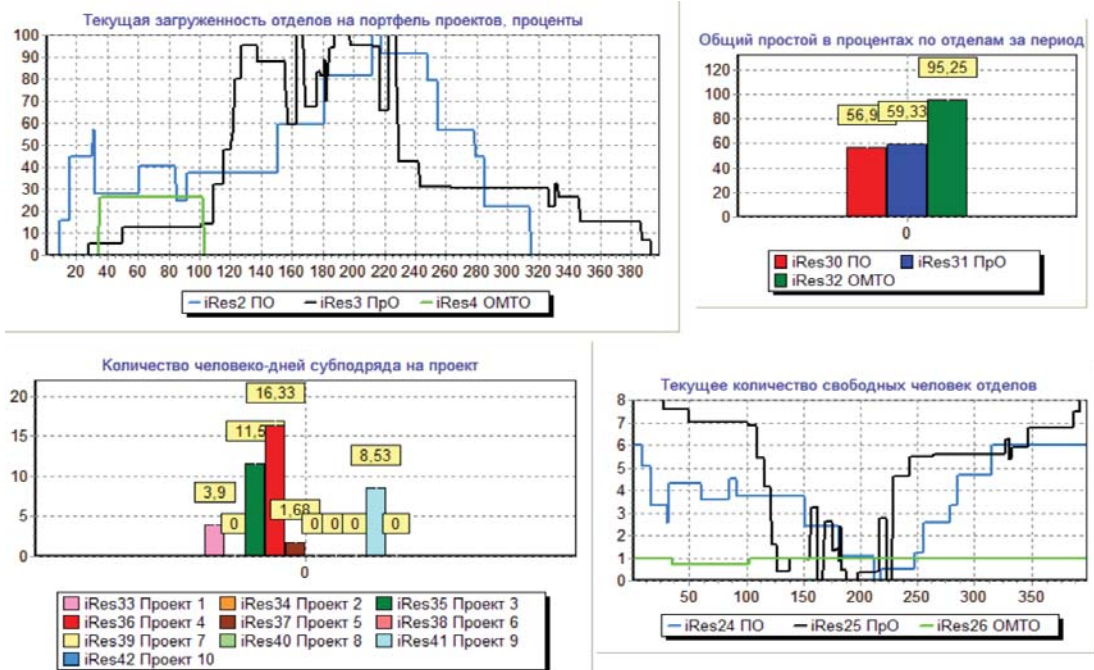
4.1.3. Применение эвристико-имитационного метода к задаче планирования

Сопоставим проведение экспериментов с моделью, на вход которой подается начальный календарный план (см. рисунок 4.3), с *вариантом В моделирования*. Вследствие увеличения портфеля проектов до 10 проектов при проигрывании варианта В моделирования возникает субподряд на проекты №1, №3 – №5 и №9 (см. рисунок 4.6.а). Общий простой отделов за полгода составил 56,91% для ПО и 59,33% для ПрО.

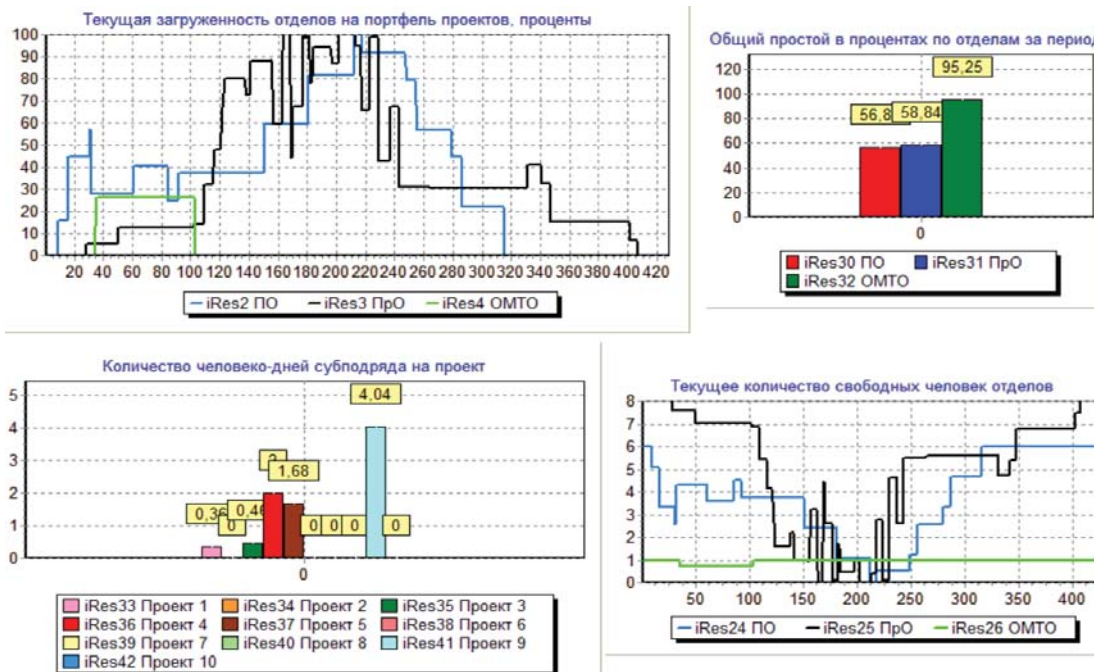
По сравнению с вариантом А моделирования общий простой уменьшился на 22,4% для ПО и на 29,5% для ПрО, что связано с появлением дополнительных 5 проектов портфеля, 2 из которых проектные, а 3 – производственные. В таблице 4.3 представлены распределения трудозатрат и стоимости субподрядных работ по проектам портфеля варианта В.

Применение эвристико-имитационного метода для анализа выходных характеристик варианта В моделирования позволило выделить следующие операции, требующие существенных затрат на проведение субподрядных работ («узкие места» планирования): операции «Монтажные и наладочные работы (учет энергии)» проектов №3 и №9

(95 990 рублей на 12 человеко-дней для проекта №3 и 70 953 рубля на 9 человеко-дней для проекта №9), все операции проекта №4 (65 998 рублей на 16 человеко-дней).



а) Вариант проигрывания В



б) Вариант проигрывания С

Рис. 4.6. Вид модели МППР: а) варианта В; б) варианта С

Т а б л и ц а 4.3

Оценка субподрядных работ при моделировании варианта В

| Операция | Проект 1 | Проект 3 | Проект 4 | Проект 5 | Проект 9 |
|--|---------------------|-------------|-------------|------------|-------------|
| Разработка технического задания | | | | 1,68 чд | |
| Монтажные и наладочные работы (телемеханика) | | | 2,45 чд | | |
| Монтажные и наладочные работы (учет энергии) | | 11,54 чд | | | 8,53 чд |
| Монтажные и наладочные работы (средства связи) | | | 13,88 чд | | |
| Обучение персонала Заказчика | 3,9 чд | | | | |
| <i>Итого трудозатрат по проекту</i> | 3,9 чд | 11,54 чд | 16,33 чд | 1,68 чд | 8,53 чд |
| <i>Стоимость трудозатрат по проекту</i> | 10 249 руб. | 95 990 руб. | 65 998 руб. | 6 746 руб. | 70 953 руб. |
| <i>Итого трудозатрат по портфелю</i> | 41,98 человеко-дней | | | | |
| <i>Стоимость трудозатрат по портфелю</i> | 249 936 рублей | | | | |

ИА планирования на основании анализа выходных характеристик модели и использования алгоритма смещения сроков работ было предложено решение о задержке начала выполнения выделенных операций на 2 недели (смещении сроков операций на 2 недели вправо по оси времени), поскольку общая загруженность отделов за полгода (43% для ПО и 40% для ПрО) позволяет своими силами выполнить данные проекты. Данное смещение не противоречит временным ограничениям, накладываемым на выполнение проектов.

Сопоставим вариант С моделирования с проведением экспериментов со скорректированным портфелем варианта В, полученным путем применения ЭИ метода. Вид имитационной модели по окончании проигрывания варианта С представлен на рисунке 4.6.б. Вследствие смещения сроков начала выполнения операций происходит перераспределение количества субподрядных работ.

В таблице 4.4 представлены распределения трудозатрат и стоимости субподрядных работ по проектам портфеля, общий объем и суммарная стоимость субподряда портфеля варианта С.

Т а б л и ц а 4.4

Оценка субподрядных работ при моделировании варианта С

| Операция | Проект 1 | Проект 3 | Проект 4 | Проект 5 | Проект 9 |
|--|-------------------|------------|------------|------------|-------------|
| Разработка ТЗ и ТРП по параллельному объекту | | | | 1,68 чд | |
| Монтажные и наладочные работы (учет энергии) | | | | | 4,04 чд |
| Монтажные и наладочные работы (средства связи) | | | 2 чд | | |
| Разработка технической документации | | 0,46 чд | | | |
| Обучение персонала Заказчика | 0,36 чд | | | | |
| <i>Итого трудозатрат по проекту</i> | 0,36 чд | 0,46 чд | 2 чд | 1,68 чд | 4,04 чд |
| <i>Стоимость трудозатрат по проекту</i> | 946 руб. | 3 826 руб. | 8 330 руб. | 6 746 руб. | 33 605 руб. |
| <i>Итого трудозатрат по портфелю</i> | 8,54 человеко-дня | | | | |
| <i>Стоимость трудозатрат по портфелю</i> | 53 453 рубля | | | | |

Общий простой отделов за полгода (с апреля по сентябрь 2010 г.) при проигрывании варианта С составил 56,85% для ПО и 58,84% для ПрО. По сравнению с вариантом В общий простой отделов уменьшился на 0,1% для ПО и на 0,8% для ПрО. Это связано с тем, что в варианте С уменьшился объем субподрядных работ, следовательно, загрузка отделов увеличилась, а суммарный простой уменьшился.

С помощью разработанной в СДМС BPsim.MAS модели исполнения работ по портфелю проектов для ЗАО «Телесистемы» был проведен анализ портфеля, состоящего из 10 проектов. Применение

разработанного ЭИ метода позволило выработать рекомендации по смещению сроков работ выполнения отдельных операций проектов. В результате объем субподрядных работ портфеля проектов сократился с 42 человеко-дней до 9 человеко-дней в полгода (объем субподрядных работ уменьшился в 4,92 раза), затраты на субподрядные работы снизились в 4,68 раз (с 249 936 рублей до 53 453 рублей в полгода).

4.1.4. Применение метода МГО к задаче планирования

Рассмотрим применение метода мультиагентной генетической оптимизации к решению задачи планирования проектных работ на предприятии ЗАО «Телесистемы».

Спроектированный ИА (визард) МГО был доработан для решения поставленной задачи планирования следующим образом: разработан алгоритм раскодирования решений популяции и алгоритм пятиточечных (вместо односточечных) операторов кроссинговера и мутации. Последняя доработка связана с наличием относительно большого числа генов в хромосоме – 210 генов (35 операций по 6 генов для кодирования каждой операции) – что влекло малую изменчивость потомков по сравнению с родителями при использовании односточечных генетических операторов. Исходя из этого, было принято решение об увеличении точек разрыва хромосомы до пяти при применении операторов кроссинговера и мутации.

Входными данными для работы ИА МГО являются: исходные сроки начал операций, размер популяции, число генов для кодирования одной операции, количество проектов в портфеле и распределение количества операций по проектам. Примем размер популяции равный 10 особям-решениям.

Для расчета функции пригодности особей будем применять разработанную в системе BPsim.MAS модель МППР выполнения проектных работ в ЗАО «Телесистемы» (см. рисунок 4.7).

Гены особи предназначены для хранения в двоичном формате информации, однозначно определяющей даты начала каждой из 35 операций портфеля с учетом использования информации, отражающей начальный календарный план выполнения проектов, составленный ЛПР (см. рисунок 4.3).

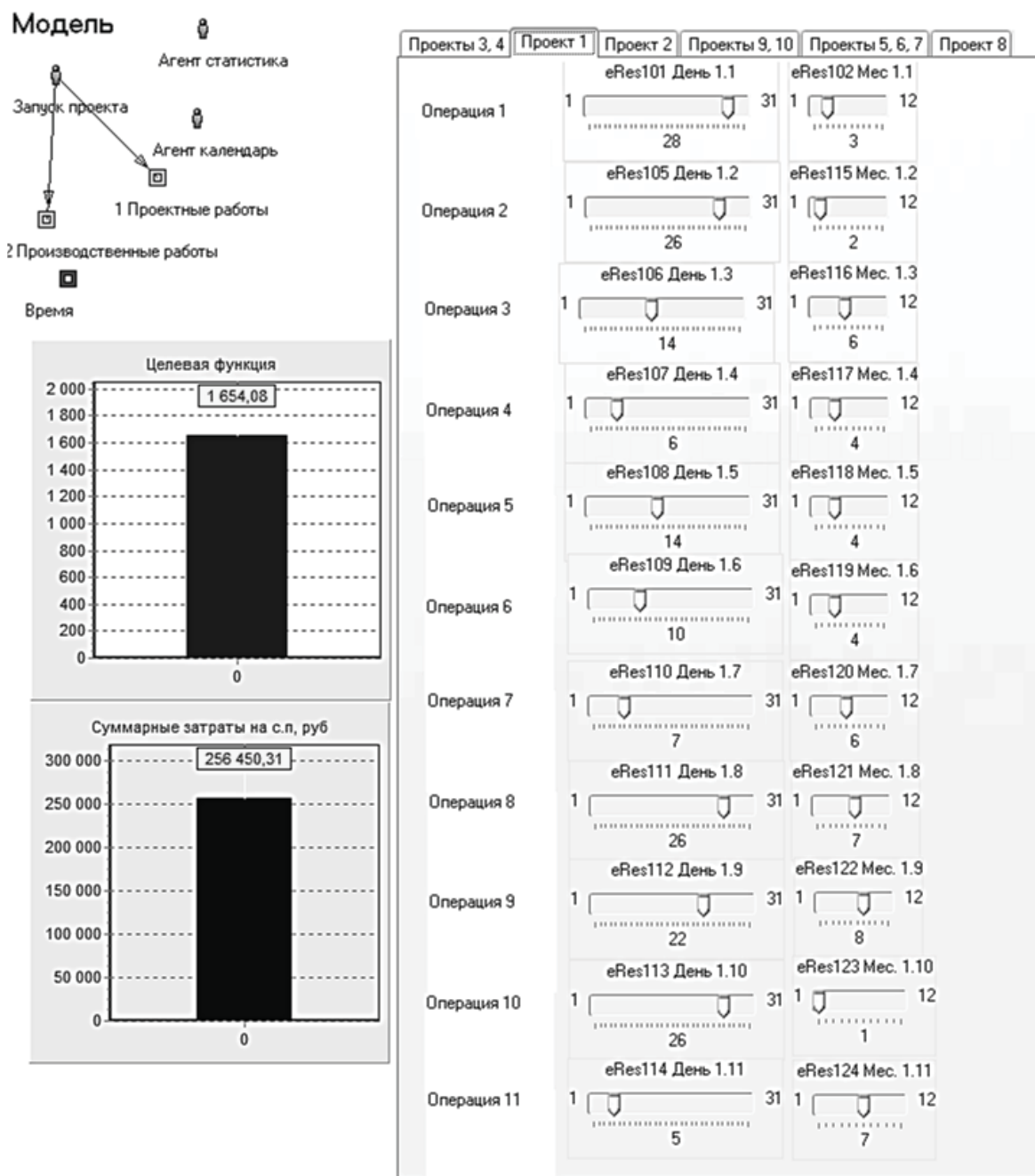


Рис. 4.7. Ввод данных в модель МППР средствами BPsim.MAS

Особь представляет собой битовую строку-хромосому длиной $6 \cdot N$ бит ($6 \cdot 35 = 210$ бит); гены в операции имеют длину 6 бит и кодируют смещение в днях даты начала выполнения операции. Из 6 бит генов 1 бит предназначен для кодирования направления смещения α_i , и 5 бит предназначены для кодирования величины смещения Δ_i с максимальным смещением в 31 день. Таким образом, особь-хромосома

кодирует одно из возможных решений задачи планирования проектных работ – отдельный календарный план работ, отражающий планируемые временные интервалы выполнения каждой из операций.

Проведем сравнительный анализ эффективности работы простого и модифицированного ГА в рамках применения ИА МГО к задаче планирования проектных работ в ЗАО “Телесистемы”.

Для простого и модифицированного ГА были заданы следующие параметры: число особей в популяции – 10; критерий останова алгоритма – смена 10 поколений; генерация случайной начальной популяции; применяемые ГО – репродукция на основе рулетки, пятиточечный кроссинговер, пятиточечная мутация с вероятностью применения 5%, инверсия с вероятностью 5%.

Для модифицированного ГА дополнительно были заданы следующие параметры: применяемые ГО – пятиточечный кроссинговер с вероятностью применения, определяемой по формулам (2.12) и (2.13), пятиточечная мутация с начальной вероятностью применения 10% и динамической вероятностью, заданной формулой (2.14), инверсия с начальной вероятностью 5%; следующие значения параметров АИО – $t_Q = 1$; $\gamma = 0,9$; $Q = 10$.

Было проведено сравнение результатов работы простого и модифицированного ГА. Для наглядности сравнения оба алгоритма исходили из одной начальной популяции. В результате работы ИА МГО была получена зависимость значений ФП особей популяции и значений целевых функций задачи от смены поколений. На рисунке 4.8 приведены графики изменения в ходе работы простого ГА (сплошная линия) и модифицированного ГА (пунктирная линия) максимального и среднего значений ФП особей (2.15), а также графики изменения минимального и среднего значений оптимизируемой при планировании величины – суммарной стоимости субподрядных работ, определяемой согласно (2.6).

Решение поставленной задачи предполагает максимизацию функции пригодности особей ГА и минимизацию стоимости субподрядных работ.

На начальной стадии работы модифицированного ГА (смена поколений 1–5) в составе ФП преобладает компонент поиска новизны (поиска оригинальных решений), с чем связаны колебания максимального и среднего значения ФП, не всегда обеспечивающие достижение лучших значений ФП и оптимизируемой величины по сравнению с работой простого ГА. Однако найденные оригинальные решения стано-

вятся основой целенаправленного поиска экстремума на поздних стадиях работы ГА (смена поколений 6–10), что приводит к повышению качества найденного решения. Для поставленной задачи, найденная в результате применения модифицированного ГА стоимость субподрядных работ (35 189 рублей) на 14% ниже стоимости субподрядных работ, полученной с использованием простого ГА (41 050 рублей).

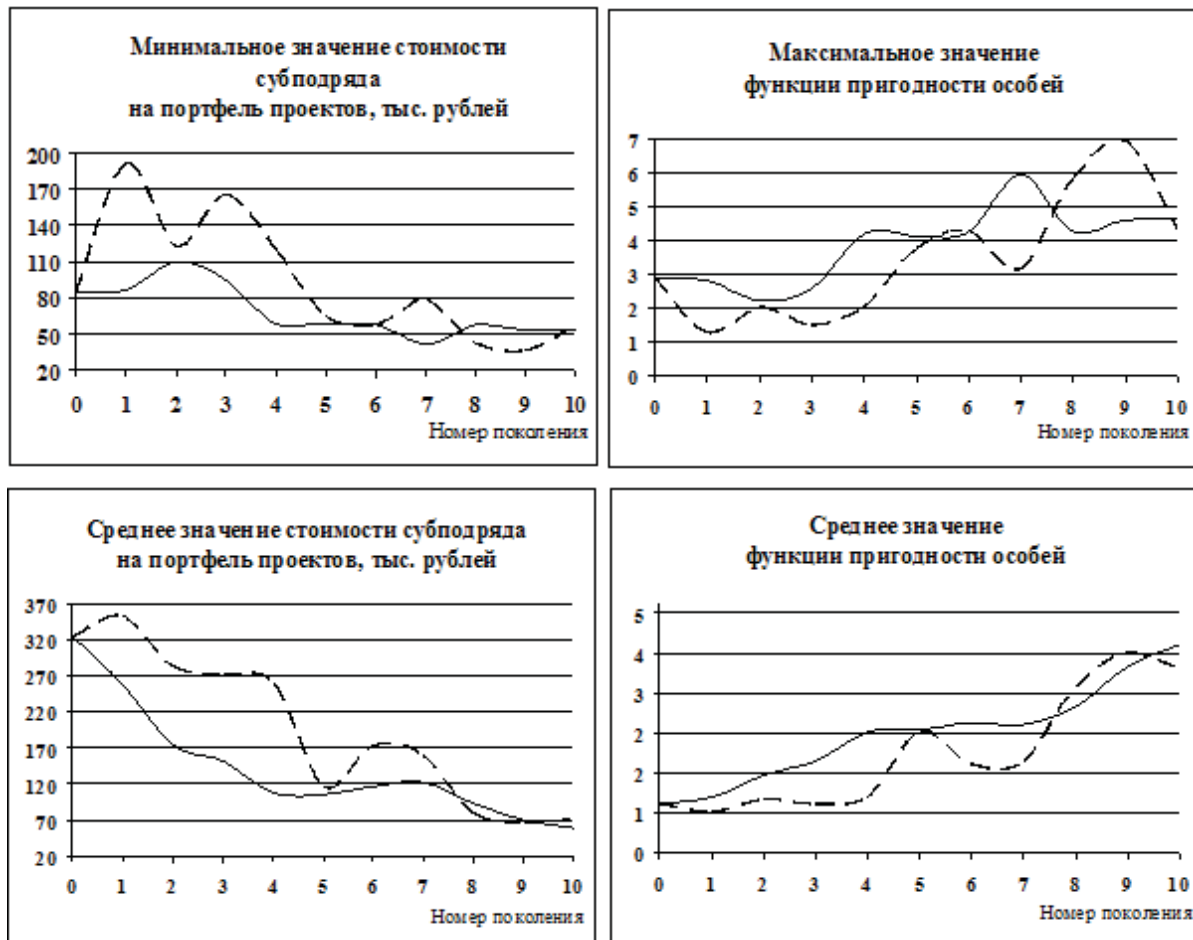


Рис. 4.8. Сравнение работы простого и модифицированного ГА

В таблице 4.5 представлены данные по значению ФП решений популяций и значению суммарных затрат на субподрядные работы (с/п) для каждого решения всех популяций при применении к поставленной задаче планирования проектных работ метода МГО с модифицированным ГА. Исходя из данных таблицы, можно сделать вывод о нахождении в 9 поколении наиболее эффективного решения задачи планирования со значением ФП=6,93 и суммарными затратами на субподрядные работы в размере 35 189 рублей (решение выделено в таблице цветом).

Таблица 4.5

Результаты работы ИА генетической оптимизации

| Номер решения | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
|----------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| Начальная популяция | | | | | | | | | | |
| Значение ФП | 0,86 | 0,75 | 0,98 | 0,66 | 0,47 | 0,44 | 0,92 | 0,90 | 0,76 | 2,87 |
| Затраты на с/п, руб. | 281 885 | 323 624 | 248 409 | 366 560 | 520 113 | 554 757 | 265 895 | 270 254 | 318 971 | 84 947 |
| Объем с/п, ч/д | 35,51 | 39,41 | 32,80 | 44,12 | 69,74 | 65,75 | 31,91 | 33,06 | 37,63 | 10,60 |
| Популяция 1 | | | | | | | | | | |
| Значение ФП | 0,67 | 0,97 | 1,27 | 0,60 | 1,12 | 0,65 | 0,36 | 0,66 | 1,20 | 0,52 |
| Затраты на с/п, руб. | 362 147 | 252 001 | 191 512 | 408 482 | 217 119 | 377 837 | 671 061 | 370 925 | 203 606 | 465 690 |
| Объем с/п, ч/д | 25,30 | 37,45 | 41,01 | 25,98 | 27,27 | 29,09 | 34,01 | 39,82 | 43,73 | 28,93 |
| Популяция 2 | | | | | | | | | | |
| Значение ФП | 1,01 | 0,70 | 1,99 | 0,70 | 0,85 | 1,56 | 0,72 | 0,45 | 1,73 | 0,82 |
| Затраты на с/п, руб. | 240 483 | 346 950 | 122 618 | 346 211 | 286 209 | 156 421 | 339 248 | 547 524 | 141 047 | 296 653 |
| Объем с/п, ч/д | 15,31 | 26,06 | 19,21 | 30,97 | 14,44 | 35,08 | 16,47 | 22,96 | 17,22 | 32,27 |
| Популяция 3 | | | | | | | | | | |
| Значение ФП | 1,27 | 1,47 | 1,20 | 1,09 | 1,06 | 0,76 | 0,65 | 0,89 | 0,78 | 0,59 |
| Затраты на с/п, руб. | 191 640 | 165 540 | 203 195 | 224 591 | 229 088 | 320 211 | 373 276 | 275 054 | 312 390 | 411 095 |
| Объем с/п, ч/д | 14,07 | 13,78 | 33,17 | 13,67 | 14,17 | 32,00 | 16,54 | 31,08 | 16,68 | 12,06 |
| Популяция 4 | | | | | | | | | | |
| Значение ФП | 1,89 | 2,03 | 1,12 | 0,69 | 0,66 | 0,79 | 1,51 | 0,68 | 0,82 | 0,87 |
| Затраты на с/п, руб. | 129 236 | 120 210 | 217 206 | 355 173 | 368 088 | 307 013 | 161 620 | 358 495 | 297 706 | 281 195 |
| Объем с/п, ч/д | 14,30 | 11,39 | 12,49 | 8,15 | 15,68 | 20,83 | 18,18 | 12,05 | 12,94 | 12,06 |

| Номер решения | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
|----------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| Популяция 5 | | | | | | | | | | |
| Значение ФП | 1,95 | 3,56 | 3,77 | 2,41 | 3,25 | 2,03 | 1,56 | 1,14 | 3,09 | 1,51 |
| Затраты на с/п, руб. | 125 081 | 68 364 | 64 715 | 101 283 | 74 873 | 120 210 | 155 766 | 214 030 | 78 778 | 161 619 |
| Объем с/п, ч/д | 13,90 | 14,36 | 11,27 | 17,13 | 12,17 | 13,89 | 13,08 | 14,28 | 18,57 | 8,24 |
| Популяция 6 | | | | | | | | | | |
| Значение ФП | 1,62 | 4,26 | 2,05 | 1,62 | 1,34 | 1,81 | 1,22 | 2,07 | 0,86 | 0,76 |
| Затраты на с/п, руб. | 150 031 | 57 260 | 118 845 | 150 036 | 182 279 | 134 746 | 198 986 | 117 841 | 282 162 | 321 645 |
| Объем с/п, ч/д | 12,91 | 9,29 | 8,66 | 13,08 | 10,03 | 7,79 | 13,81 | 29,51 | 24,46 | 15,34 |
| Популяция 7 | | | | | | | | | | |
| Значение ФП | 0,98 | 2,15 | 2,38 | 1,60 | 3,14 | 2,02 | 0,92 | 1,13 | 1,15 | 2,81 |
| Затраты на с/п, руб. | 247 702 | 113 350 | 102 353 | 152 181 | 77 552 | 120 904 | 264 963 | 215 628 | 211 382 | 86 719 |
| Объем с/п, ч/д | 11,51 | 24,79 | 21,51 | 12,05 | 11,30 | 9,79 | 25,11 | 12,73 | 5,82 | 16,96 |
| Популяция 8 | | | | | | | | | | |
| Значение ФП | 2,69 | 3,07 | 3,09 | 2,52 | 5,10 | 4,25 | 2,74 | 2,86 | 3,47 | 2,42 |
| Затраты на с/п, руб. | 90 449 | 79 461 | 78 907 | 96 605 | 47 800 | 57 358 | 88 985 | 85 345 | 70 195 | 100 712 |
| Объем с/п, ч/д | 11,93 | 11,98 | 10,66 | 12,73 | 7,53 | 9,49 | 11,19 | 11,11 | 10,01 | 12,33 |
| Популяция 9 | | | | | | | | | | |
| Значение ФП | 3,52 | 3,94 | 4,35 | 1,88 | 6,93 | 2,89 | 3,83 | 3,86 | 4,25 | 4,28 |
| Затраты на с/п, руб. | 69 276 | 61 785 | 56 049 | 129 664 | 35 189 | 84 446 | 63 549 | 63 150 | 57 358 | 56 957 |
| Объем с/п, ч/д | 9,63 | 8,53 | 8,99 | 17,48 | 6,31 | 12,45 | 10,19 | 10,02 | 9,49 | 9,33 |
| Популяция 10 | | | | | | | | | | |
| Значение ФП | 2,69 | 4,57 | 4,29 | 4,28 | 3,22 | 4,28 | 4,11 | 2,74 | 4,29 | 2,42 |
| Затраты на с/п, руб. | 90 449 | 53 346 | 56 821 | 56 957 | 75 684 | 56 957 | 59 296 | 88 985 | 56 821 | 100 712 |
| Объем с/п, ч/д | 11,93 | 7,83 | 9,30 | 9,33 | 11,57 | 9,33 | 8,38 | 11,19 | 9,30 | 12,33 |

Сопоставим вариант *D* моделирования с проведением экспериментов с моделью, на вход которой подается план работ, полученный в результате применения метода МГО с модифицированным ГА. Вид имитационной модели по окончании проигрывания варианта *D* моделирования представлен на рисунке 4.9.

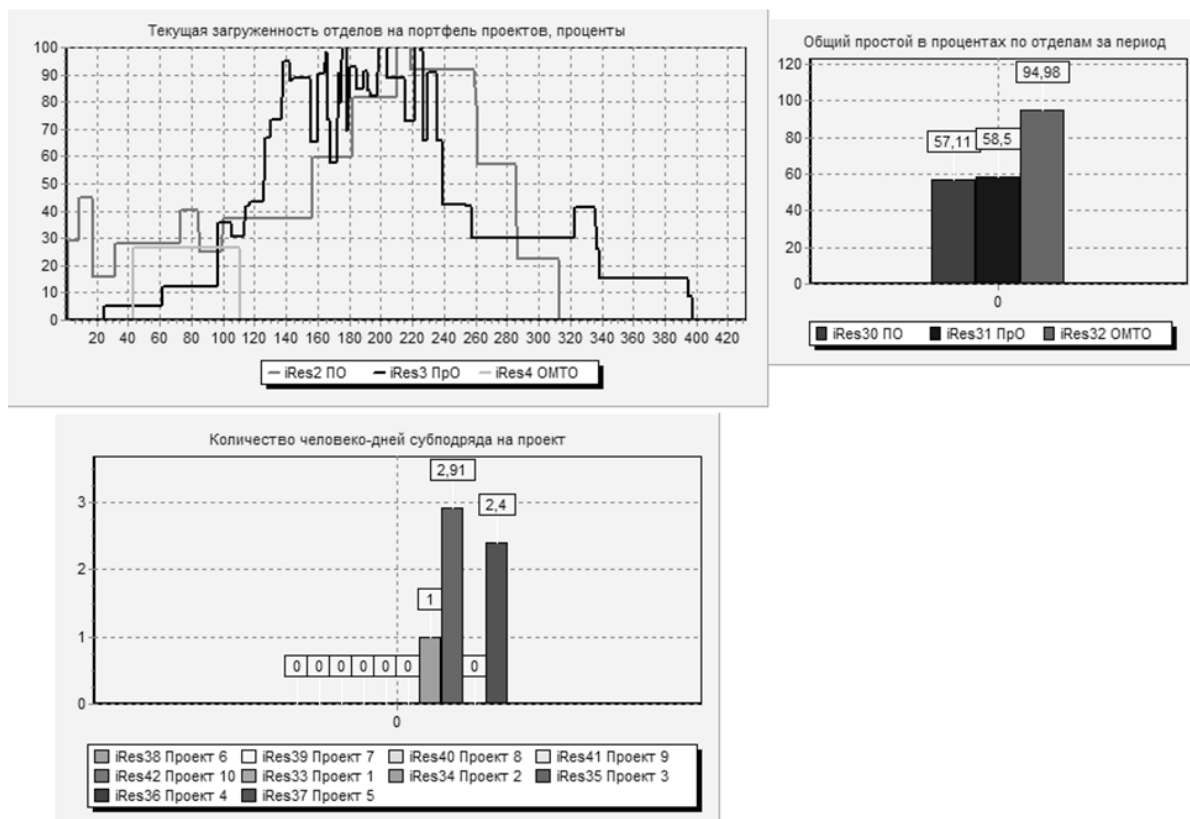


Рис. 4.9. Вид модели по окончании проигрывания варианта *D*

В таблице 4.6 представлены распределения трудозатрат и стоимости субподрядных работ по проектам, общий объем и стоимость субподряда портфеля варианта *D*. Общий простой отделов за полгода при проигрывании варианта *D* составил 57,11% для *ПО* и 58,5% для *ПрО*. По сравнению с вариантом *B* моделирования общий объем субподрядных работ сократился в 6,7 раза (с 42 человеко-дней до 6 человеко-дней), затраты на субподрядные работы снизились в 7,1 раза (с 249 936 рублей до 35 189 рублей в полгода).

Экономический эффект при применении ИА МГО для решения задачи планирования в ЗАО «Телесистемы» составляет 390 000 рублей в год.

Т а б л и ц а 4.6

Оценка субподрядных работ при моделировании варианта D

| Операция | Проект 2 | Проект 3 | Проект 5 |
|--|--------------------|-------------|-------------|
| Разработка ТЗ и ТРП по параллельному объекту | | | 2,4 чд |
| Монтажные и наладочные работы (телемеханика) | | 2,02 чд | |
| Монтажные и наладочные работы (средства связи) | 1 чд | | |
| Разработка технической документации | | 0,89 чд | |
| <i>Итого трудозатрат по проекту</i> | 1 чд | 2,91 чд | 2,4 чд |
| <i>Стоимость трудозатрат по проекту</i> | 8 805 руб. | 19 733 руб. | 15 456 руб. |
| <i>Итого трудозатрат по портфелю</i> | 6,31 человеко-день | | |
| <i>Стоимость трудозатрат по портфелю</i> | 35 189 рублей | | |

4.1.5. Сравнительный анализ использования методов планирования

Проведем сравнительный анализ эффективности решений задачи планирования проектных работ для ЗАО «Телесистемы», построенных ЛПР (начальный план работ) и найденных с помощью ЭИ метода и метода МГО. Гистограммы стоимости субподряда (2.6) и простоя производственного отдела (2.3) при решении задачи различными методами приведены на рисунке 4.10.

В результате анализа решений задачи планирования, найденных различными методами, был сделан вывод о наиболее эффективной работе метода мультиагентной генетической оптимизации. Применение данного метода позволило снизить на 30% стоимость субподрядных работ по портфелю проектов, на 1,5 % простой производственного отдела в течение полугода по сравнению с предложенным эвристико-имитационным методом, а также снизить стоимость субподрядных работ по портфелю проектов в 6,7 раз по сравнению с начальным решением.

Задача планирования проектных работ для компании «Телесистемы» была решена также с использованием метода перераспределения ресурсов MS Project. Данный метод реализован в популярной программе сетевого планирования MS Project и подразумевает автоматическое проведение сдвига начала выполнения тех работ, по которым превышает доступность ресурсов.

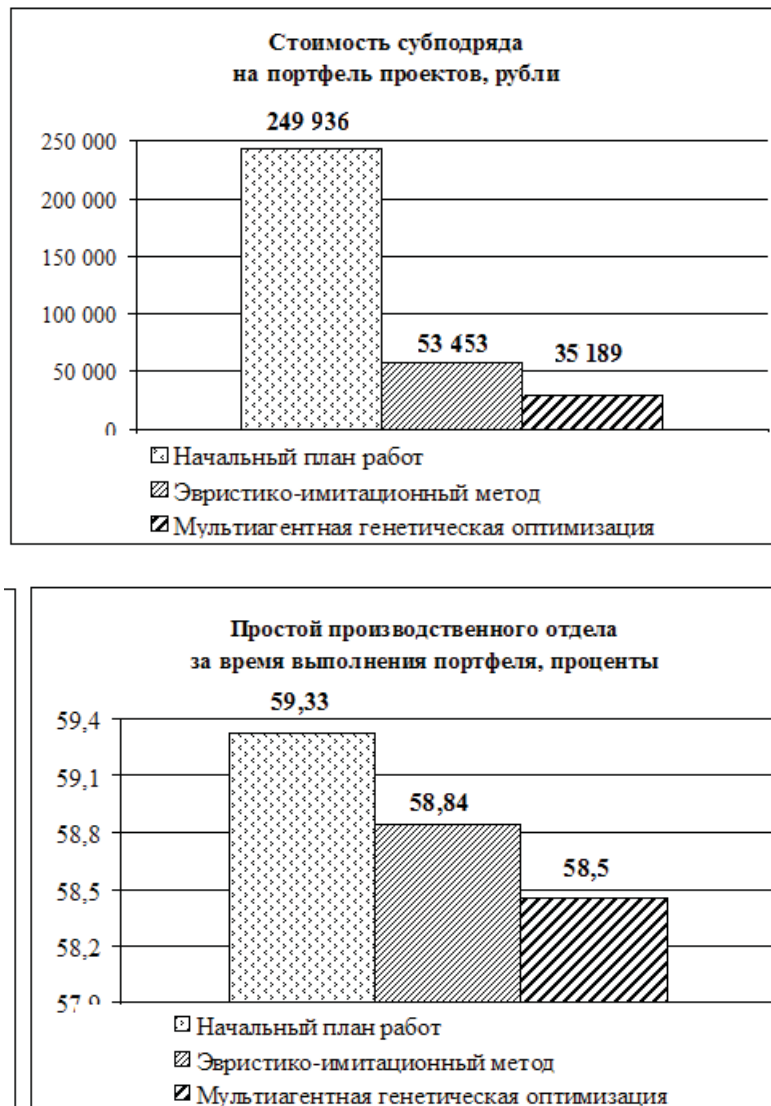


Рис. 4.10. Изменение значений выходных характеристик системы

В рассматриваемой задаче календарного планирования для начального плана работ, составленного экспертами, наблюдается превышение доступности ресурса производственного отдела (см. рисунок 4.11). На рисунке по оси x представлены временные интервалы длительностью 12 дней, по оси y – процентная загрузка. Превышение доступности собственных ресурсов (временные интервалы, для которых необходимо применение субподряда) показаны темными прямоугольниками выше линии стопроцентной загрузки.

Применение метода перераспределения ресурсов MS Project позволило снизить стоимость субподрядных работ до нуля (т.е. целевая

функция (2.6) достигла своего оптимального значения). Но ограничения на складываемые ресурсы (2.7) и временные ограничения (2.8) не были удовлетворены при применении данного метода. Следовательно, метод перераспределения ресурсов MS Project не пригоден для решения поставленной задачи планирования проектных работ.

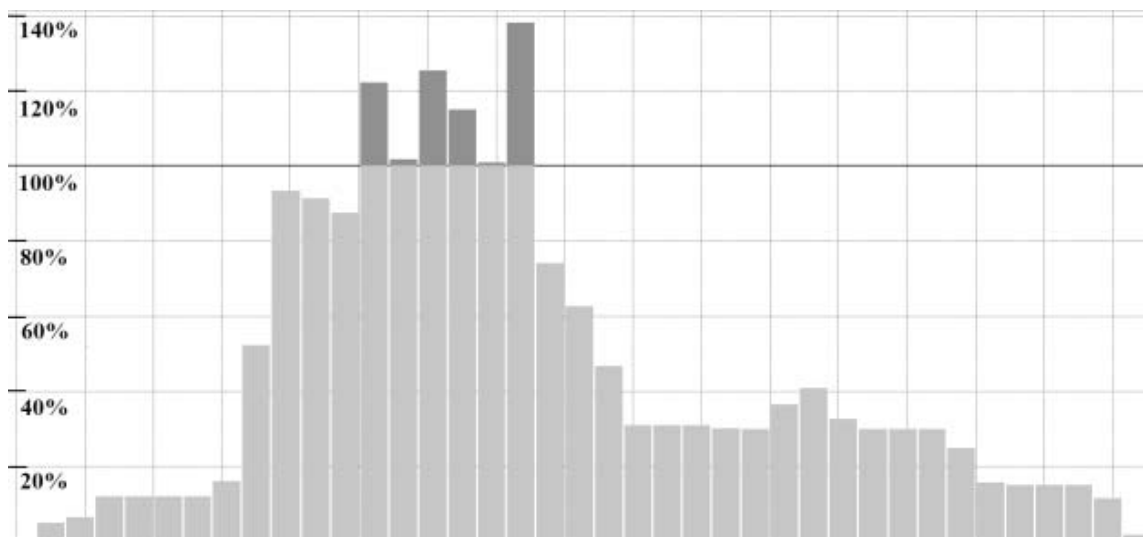


Рис. 4.11. Загрузка производственного отдела для начального плана работ

На рисунке 4.12 приведена гистограмма процентной загрузки производственного отдела для решений, найденных методами МГО и ЭИМ.

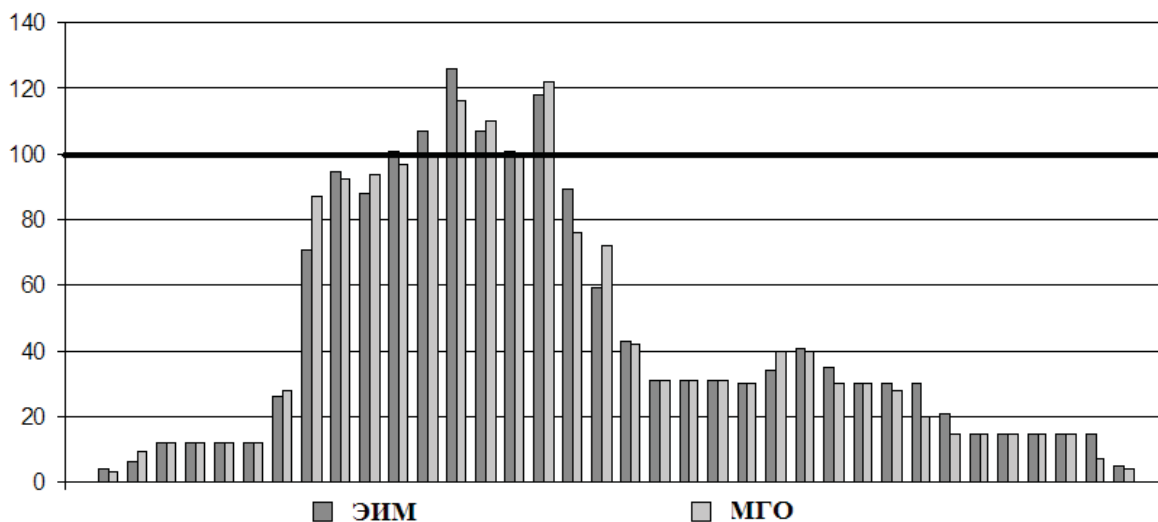


Рис. 4.12. Процентные загрузки производственного отдела при применении различных методов поиска решения

Как следует из графика, загрузка отдела меняется не значительно при использовании разных методов. Тем не менее, в решении, найденном с помощью метода МГО, достигается снижение суммарной стоимости субподрядных работ на 30% по сравнению использованием ЭИ метода. Данный факт связан с нацеленностью эволюционной компоненты метода МГО на поиск решения с распределением ресурсов, оптимальным по значению субподрядной стоимости, в то время как алгоритм работы ЭИМ прекращает поиск в случае перехода за пороговое значение субподрядной стоимости, заданное экспертами.

При применении обоих методов (МГО и ЭИ) все временные ограничения были удовлетворены. Суммарный простой отдела свидетельствует о наличии резерва собственных трудовых ресурсов для реализации дополнительных проектов. Экономический эффект от использования метода МГО при решении задачи планирования на предприятии «Телесистемы» составил 390 000 рублей в год, что на 12% выше экономического эффекта от применения эвристико-имитационного метода для решения той же задачи.

Сравнение качества решений, полученных с помощью метода перераспределения ресурсов, реализованного в MS Project на основе МКП, базового плана, составленного ЛПР, и разработанных методов ЭИ и МГО приведено в таблице 4.7.

Т а б л и ц а 4 . 7

Оценка качества решения для разработанных методов
и метода перераспределения ресурсов MS Project

| Метод | Качество решения | | | Время поиска, мин |
|--------------|--|------------------------------|------------------------------|-------------------|
| | Стоимость затрат на с/п, руб, согласно (2.6) | Выполнение ограничения (2.7) | Выполнение ограничения (2.8) | |
| MS Project | 0 | Не учитывается | Нет | 2 |
| МГО | 35 189 | Да | Да | 25 |
| ЭИ | 53 453 | Да | Да | 17,5 |
| Базовый план | 249 936 | Да | Да | 10 |

Качество решения оценивалось с помощью значения целевой функции (2.6) решаемой задачи планирования с учетом оптимального значения затрат на субподряд (с/п), равного нулю. Также учитывались

ограничения задачи (2.7) на доступность складировуемых ресурсов при выполнении каждой операции и временные ограничения (2.8) на даты начала выполнения операций. Расчет времени поиска решения методами ЭИ и МГО приведен в разделе 4.1.1.

В результате проведенного сравнения был сделан вывод о предпочтительности метода МГО с точки зрения качества найденного решения при выполнении всех рассматриваемых ограничений. Использование метода МГО позволило повысить качество решения на 30% по сравнению с использованием ЭИ метода, а также позволило повысить качество решения в 6,7 раза по сравнению с начальным календарным планом работ. Ввиду отсутствия учета рассматриваемых ограничений метод перераспределения ресурсов MS Project не пригоден для решения поставленной задачи планирования проектных работ.

4.2. Применение метода МГО к задачам планирования бизнес-процессов производства

Модуль СМП и модуль ОПП (реализующий метод МГО) системы АС ВМП, были применены при участии авторов для решения задач анализа и планирования бизнес-процессов, протекающих в производственных системах [137–152].

Рассмотрим задачу *планирования организационных процессов* реализации мер по недопущению инцидентов: технологических – ТИ, логистических – ЛИ или организационных – ОргИ. Необходимо определить наиболее эффективное количество человек в отделах, при котором процент закрытых инцидентов по завершении двух месяцев будет максимальным, а стоимость оплаты суммарного простоя сотрудников отделов предприятия будет минимальной. В рамках исследования выделяются следующие отделы с базовыми настройками: отдел технологов (5 сотрудников); отдел специалистов по логистике (5 сотрудников), отдел разрешения организационных инцидентов (3 сотрудника) и комитет по изменениям (1 сотрудник). Применение метода МГО в составе АС ВМП к поставленной задаче опубликовано авторами в [139].

Последовательность операций, выполняемых в рамках процесса реализации мер по недопущению инцидентов, представлена на рисунке 4.13; также на рисунке указано время выполнения операций.

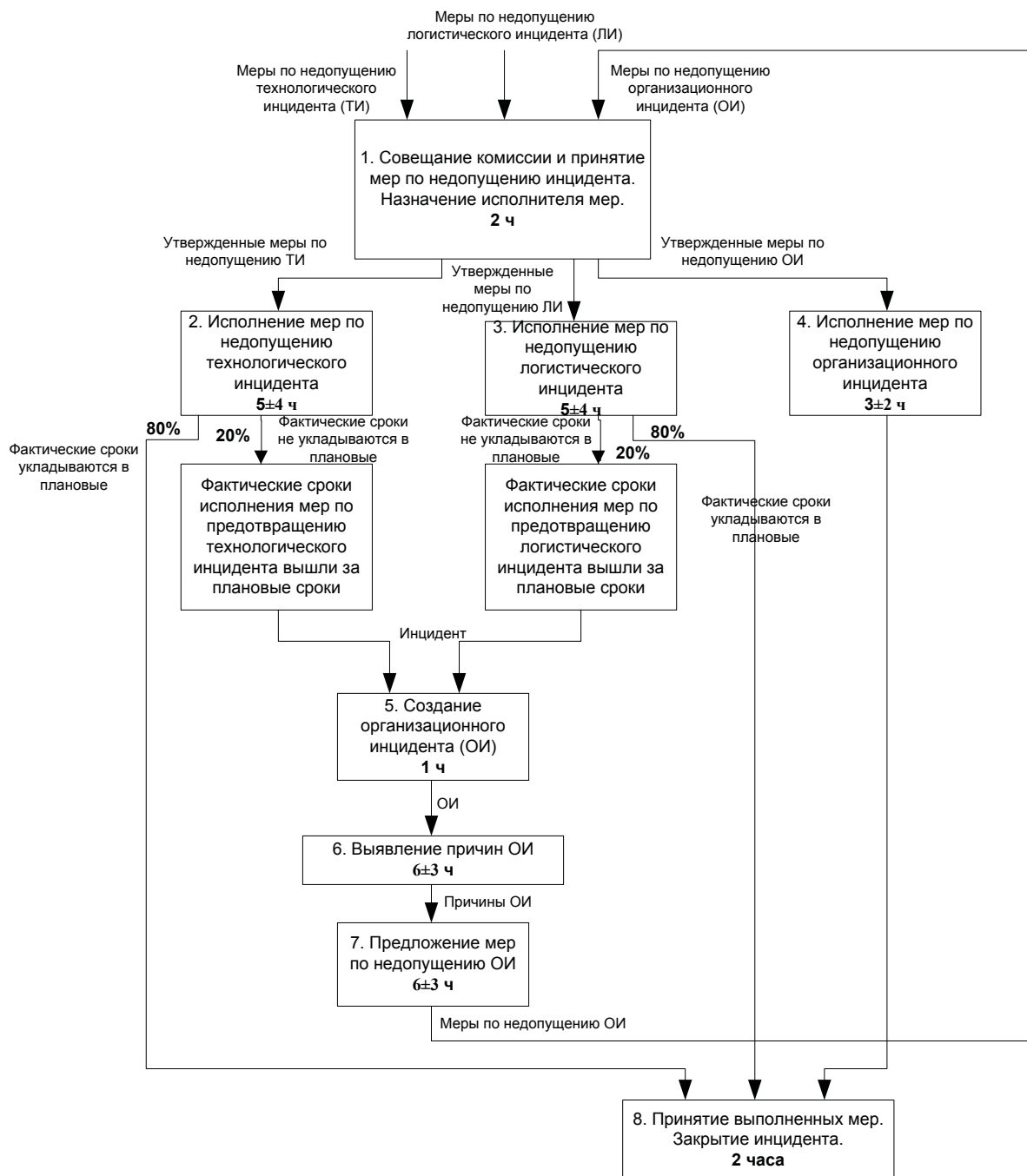


Рис. 4.13. Схема процесса проведения изменений по совершенствованию производства.

При выходе фактических сроков выполнения операций за плановые сроки время выполнения операций №2 и №3 увеличивается на 3 часа. Процесс реализации мер состоит из восьми этапов. На первом этапе происходит распределение инцидентов по отделам при участии

комитета по изменениям. Со второго по четвертый этап разрешаются различные типы инцидентов в соответствующих отделах. При этом технологические и логистические инциденты с превышенным сроком разрешения порождают организационные инциденты, для которых устанавливаются причины и осуществляется поиск мер с пятого по седьмой этап. На восьмом этапе реализованные меры по всем типам инцидентов принимаются комитетом по изменениям и инциденты закрываются. На вход системы каждые 3 часа поступают меры по недопущению технологического инцидента, каждые 4 часа – меры по недопущению логистического инцидента.

Трудовые ресурсы задействованы в выполнении процесса проведения изменений следующим образом. Для выполнения операции №1 или операции №8 требуется 1 комитет по изменениям, 2 заинтересованных лица из числа технологов для ТИ, или логистов для ЛИ, или специалистов отдела разрешения организационных инцидентов для ОргИ. Для выполнения операции №2 требуется 1 технолог. Для выполнения операции №3 требуется 1 логист. Для выполнения операций №4, №№5–7 требуется 1 специалист отдела разрешения организационных инцидентов. Стоимость 1 человеко-часа по отделам распределена следующим образом: отдел технологов – 250 у.е., отдел специалистов по логистике – 250 у.е., комитет по изменениям – 150 у.е., отдел разрешения организационных инцидентов – 150 у.е.

Для решения поставленной задачи в модуле СМП системы АС ВМП была разработана модель МППР реализации принятых мер (см. рисунок 4.14). Модель реализована на ресурсах, представляющих собой очереди на выполнение соответствующих операций. При описании процессов реализации принятых мер по недопущению инцидентов применялась декомпозиция узлов модели. Для распределения операций реализации мер по отделам-исполнителям и определения вероятности превышения расчетного времени исполнения мер над фактическим временем исполнения использовались агенты. Исполнение мер по недопущению технологических и логистических инцидентов описано с декомпозицией на два процесса: исполнение мер с нормальным временем выполнения и исполнение мер с превышенным временем выполнения, что приводит к возникновению организационных инцидентов. Для выполнения данных процессов в агенте распределения по исполнителям формируются очереди мер на исполнение.

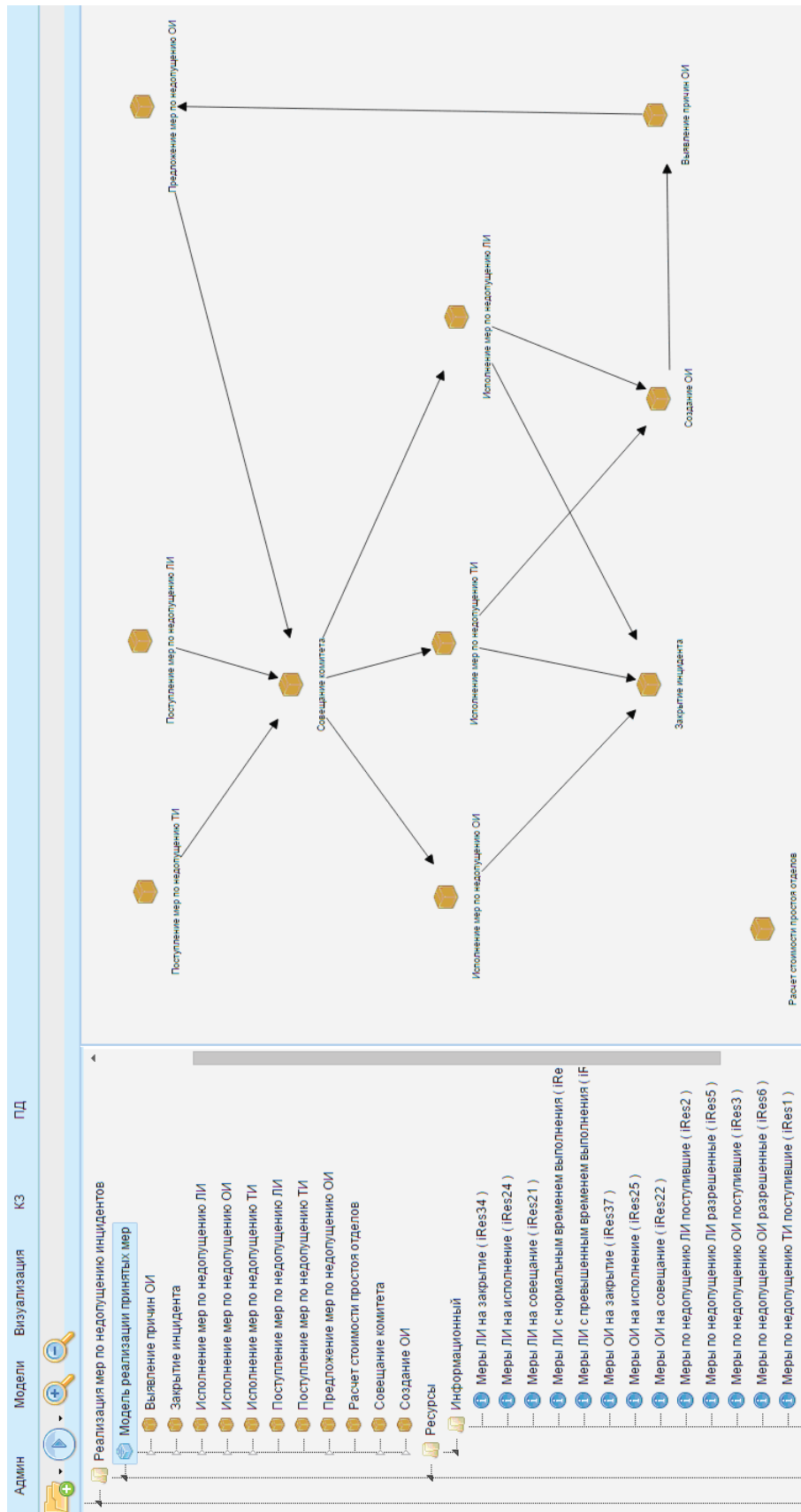


Рис. 4.14. Структура модели реализации принятых мер в СМП АС ВМП

В качестве входной информации для моделирования применялись статистические данные о количестве поступивших инцидентов каждого вида, количестве инцидентов, разрешенных в срок и количестве инцидентов, разрешенных не в срок. Статистические данные были получены из хранилища данных системы АС ВМП с помощью модулей конструктора запросов и подготовки данных системы АС ВМП. Вид модуля подготовки данных с примером статистических данных, анализируемых и передаваемых имитационной модели, приведен на рисунке 4.15.

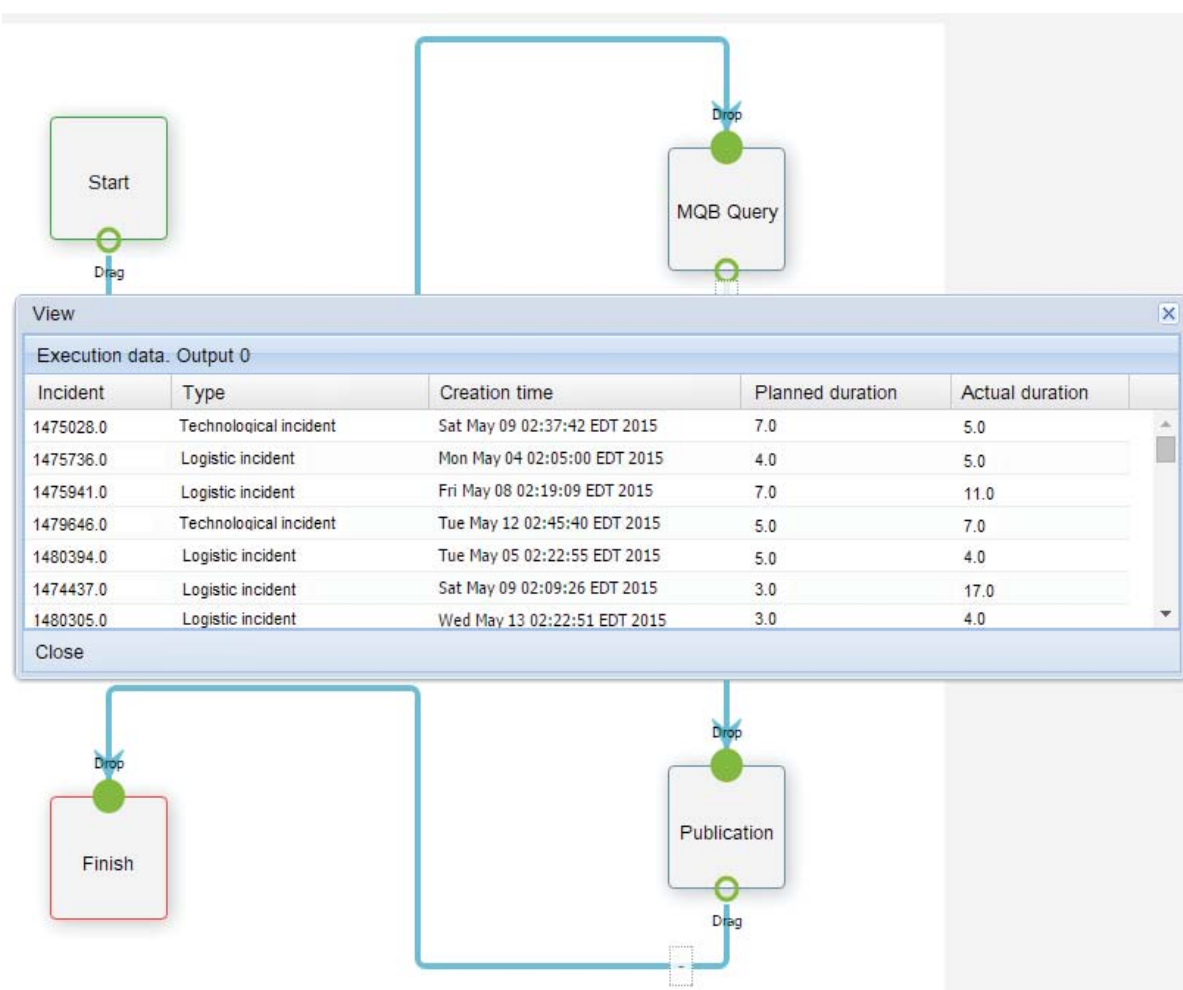


Рис. 4.15. Вид модуля ПД с примером анализируемой статистики

Для применения метода МГО были использованы следующие настройки. Входные управляемые параметры модели менялись следующим образом: комитет по изменениям – от 1 до 2 человек, отдел

логистов – от 4 до 5 человек, отдел технологов – от 4 до 5 человек, отдел разрешения ОргИ – от 2 до 3 человек. В качестве выходной информации моделирования рассматривалась величина, обратная стоимости оплаты простоя сотрудников отделов, которую необходимо было максимизировать. Число хромосом в популяции было задано 10 хромосомами, предельное число поколений – 6 поколений.

В результате применения метода МГО было сформировано 6 поколений, содержащих решения с различными наборами значений входных управляемых параметров модели в заданном диапазоне. Решение с лучшим результатом характеризуется следующими значениями управляемых параметров: 4 технолога, 5 логистов, 2 человека из комитета по изменениям и 2 специалиста по решению организационных инцидентов. Для данного решения сумма оплаты простоя сотрудников четырех отделов за два месяца составила на 11% меньше стоимости простоя для базового эксперимента. Для выбранного решения с лучшим результатом был получен следующий процент закрытых инцидентов по типам инцидентов (см. рисунок 4.16): технологические инциденты – 48,76%, логистические инциденты – 97,95%, организационные инциденты – 100%.

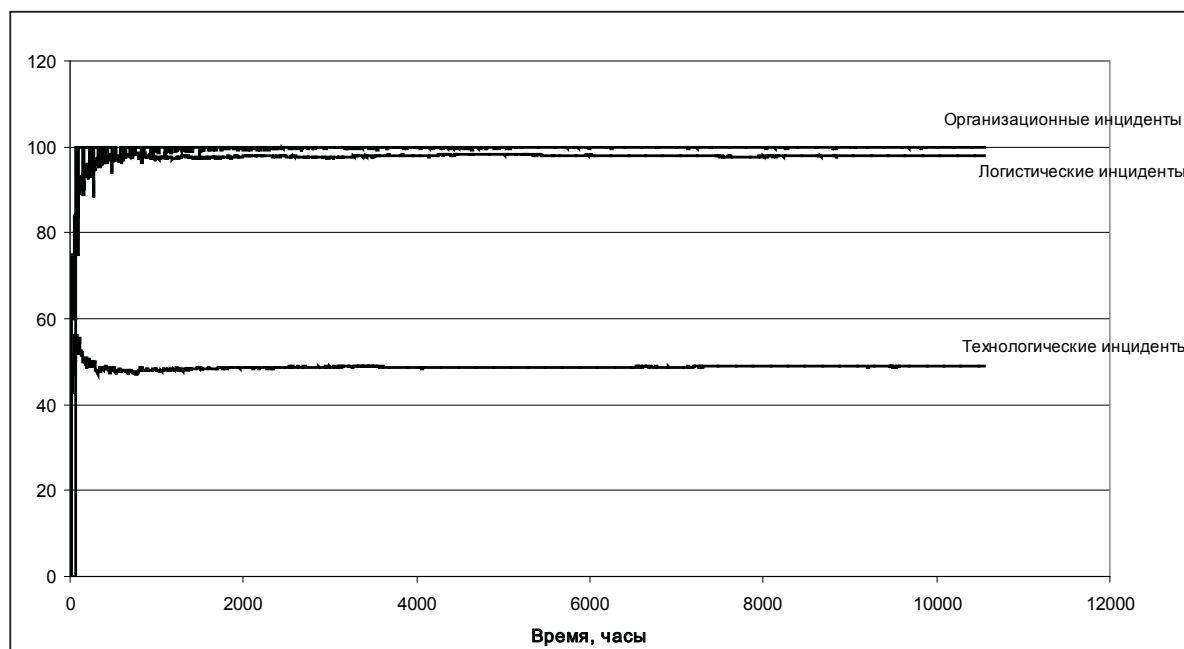


Рис. 4.16. Процент закрытых инцидентов для решения с лучшим результатом

Низкий процент закрытых технологических инцидентов связан с длительным временем разрешения инцидентов данного типа. Зачастую, технологические инциденты связаны с несовершенством технологии изготовления продукции. Изменение существующей технологии изготовления – это длительный процесс, который может занять от одной недели до нескольких месяцев.

Рассмотрим задачу *планирования организационных процессов телекоммуникационного сопровождения производственных процессов*.

Рассматриваемые организационные процессы телекоммуникационного сопровождения производства включают в себя прием, обработку и разрешение трех типов инцидентов (сервисные инциденты, запросы на обслуживание и запросы на консультацию) по шести видам предоставляемого сервиса (IP-телефония, локальная вычислительная сеть, промышленная громкоговорящая связь, промышленное видеонаблюдение, радиосвязь и телефонная связь) для двух цехов горячей (ГП) и холодной (ХП) прокатки. Исполнителями процесса являются сотрудники отделов сопровождения телекоммуникационных систем цехов; каждый отдел включает в себя две группы: группу обслуживания оборудования (ГОО) и группу обслуживания телекоммуникационных систем и АСУ ТП (группа ГОТС). Задача организации процессов сопровождения заключается в определении минимального числа сотрудников отделов при сохранении всех должностей и при обеспечении максимальной средней загрузки каждого сотрудника и максимального процента разрешенных инцидентов. Применение метода МГО к поставленной задаче опубликовано авторами в [137].

Для работы метода МГО были выделены следующие управляемые параметры. Для цеха горячей прокатки: число инженеров в отделе ГОО (4 чел.), число ведущих инженеров (2 чел.) и администраторов (4 чел.) в отделе ГОТС; для цеха холодной прокатки: число ведущих инженеров (1 чел.) и администраторов (4 чел.) в отделе ГОТС. В скобках указано количество сотрудников для базового эксперимента.

На основании собранных статистических данных функционирования исследуемых процессов была разработана мультиагентная модель процесса преобразования ресурсов в модуле СМП системы АС ВМП (см. рисунок 4.17).

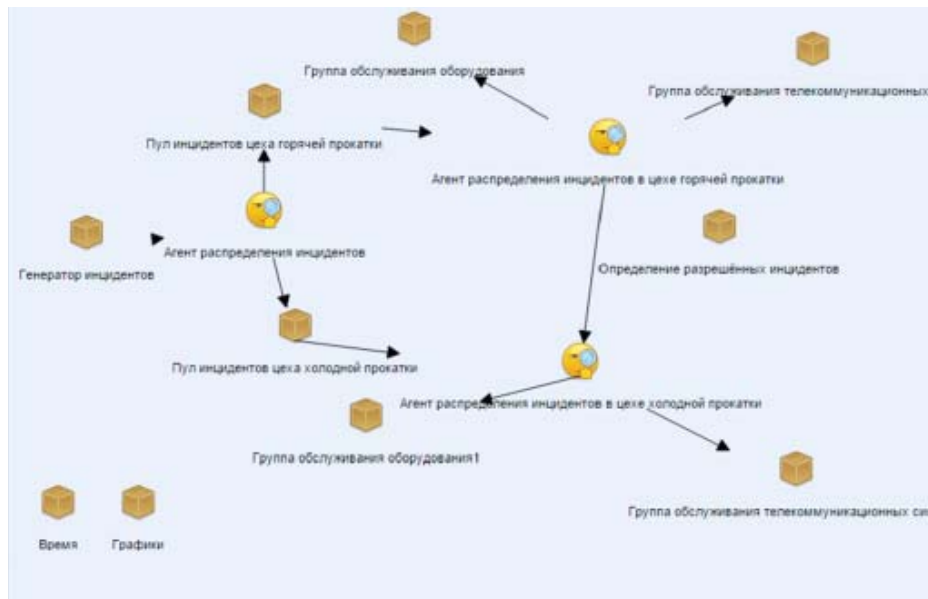


Рис. 4.17. Структура модели процессов телекоммуникационного сопровождения в модуле СМП системы АС ВМП

Результаты применения метода МГО к решению поставленной задачи приведены на рисунке 4.18 в виде фрагмента окна работы пользователя с модулем ОПП системы АС ВМП. В ходе работы алгоритма проводилась максимизация выходного параметра исследуемого процесса «Средняя загрузка всех сотрудников в процентах». Найденное решение, представленное на рисунке 4.18 в столбце «Оптимальное значение», соответствует значению средней загрузки всех сотрудников, равной 62%.

| Выходной параметр | | | |
|-------------------------|-------------------------------------|-----------------------|---|
| Наименование параметра: | Средняя загрузка сотрудников в проц | | Оптимальное значение: 62.22990149348584 |
| Входные параметры | | | |
| Наименование параметра | Минимальное значение | Максимальное значение | Оптимальное значение |
| ГП.ГОО.Инж | 3 | 4 | 3 |
| ГП.ГОТС.ВедИнж | 1 | 2 | 1 |
| ХП.ГОТС.Адм | 1 | 4 | 1 |
| ХП.ГОТС.ВедИнж | 1 | 2 | 1 |
| ГП.ГОТС.Адм | 1 | 4 | 1 |

Рис. 4.18. Фрагмент окна модуля ОПП системы АС ВМП с результатами работы метода МГО

На рисунке 4.19 приведен пример изменения для базового эксперимента средней загруженности в процентах инженеров группы обслуживания оборудования в цехе горячей прокатки в течение месяца (14480 минут), а на рисунке 4.20 – пример изменения средней загруженности инженеров той же группы за тот же период для решения с лучшим результатом (метод МГО).

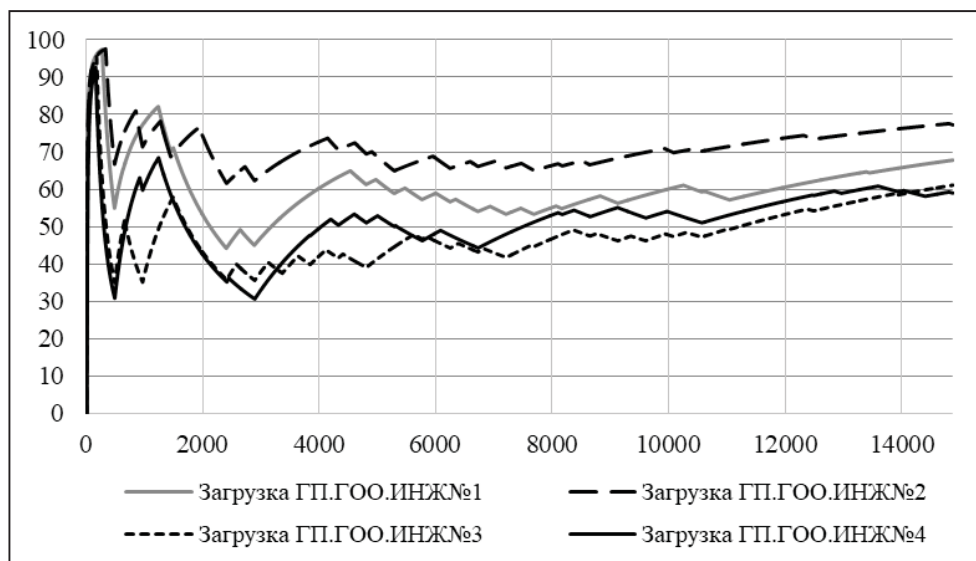


Рис. 4.19. Средняя загруженность в процентах инженеров группы ГОО в цехе ГП в течение месяца (14480 минут) для базового эксперимента

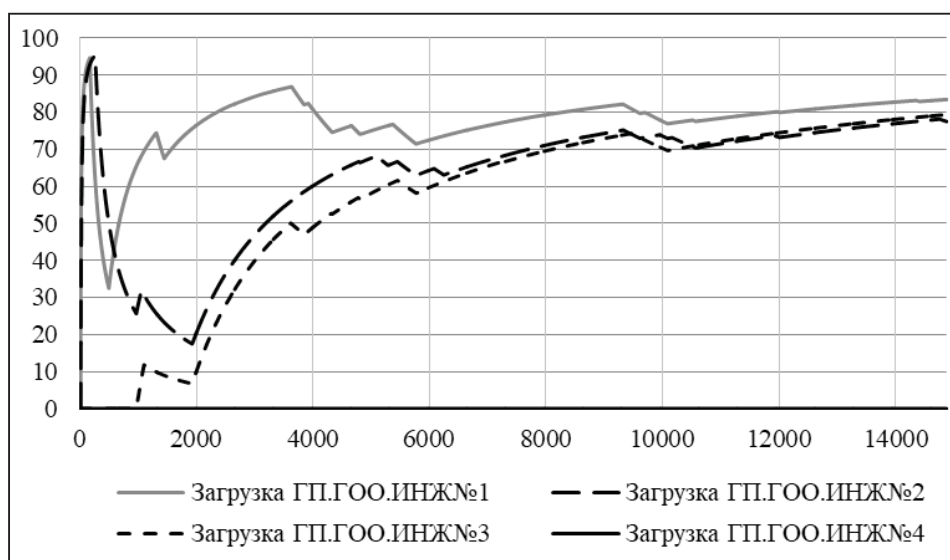


Рис. 4.20. Средняя загруженность в процентах инженеров группы ГОО в цехе горячей прокатки в течение месяца для решения с лучшим результатом

Снижение числа инженеров, ответственных за разрешение определенных типов инцидентов, позволило повысить среднюю загрузженность группы инженеров из отдела ГОО цеха горячей прокатки на 13,6%, при этом процент разрешенных инцидентов на конец месяца остался высоким (выше 90% для всех инцидентов). Также снижение числа ведущих инженеров из отдела ГОТС цеха холодной прокатки позволило повысить среднюю загрузженность группы инженеров цеха холодной прокатки на 34%.

4.3. Выводы

1. Полученные теоретические результаты, реализованные в ИА мультиагентной генетической оптимизации, прошли проверку в условиях действующего предприятия, экономический эффект составил 390 000 рублей в год, что подтвердило правильность и обоснованность разработанных положений и выводов.

2. Информационная технология мультиагентной генетической оптимизации работоспособна и обеспечивает возможность:

- имитационного и эволюционного моделирования;
- решения задачи планирования работ с оптимизацией субподряда;
- формирования и анализа эффективности применения альтернативных календарных планов работ;
- формирования отчетов по результатам экспериментов;
- поддержку русского языка.

3. Полученные теоретические результаты, реализованные в информационной технологии мультиагентного имитационно-эволюционного моделирования модуля ОПП АС ВМП, были апробированы при решении реальных задач планирования БП, что подтвердило правильность и обоснованность разработанных положений и выводов.

4. Информационная технология мультиагентного имитационно-эволюционного моделирования работоспособна и обеспечивает возможность:

- имитационного и эволюционного моделирования;
- решения задачи планирования бизнес-процессов;
- формирования и анализа эффективности применения альтернативных планов организации бизнес-процессов;
- формирования отчетов по результатам экспериментов;
- поддержку русского языка.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе выполнения представленной работы получены следующие результаты:

1. Поставлена задача планирования работ с учетом минимизации затрат на привлечение субподрядных нескладируемых ресурсов, наличия ограниченных складированных ресурсов и директивных сроков выполнения.

2. Проведен анализ существующих методов календарного планирования, в результате которого выявлены факторы, препятствующие применению указанных методов к решению рассматриваемой задачи: 1) отсутствие поиска оптимального назначения нескладируемых ресурсов на работы с точки зрения минимизации стоимости привлекаемого субподряда; 2) отсутствие учета ограниченных складированных ресурсов, в том числе времени жизни ресурса. Указанные ограничения свидетельствуют об актуальности разработки гибридного метода планирования на основе интеграции имитационного и эволюционного моделирования, учитывающего приведенные ограничения.

3. Разработан алгоритм интеллектуального планирования, основанный на использовании мультиагентной имитационной модели распределения ресурсов и эвристических правил смещения сроков начала выполнения работ. Данный алгоритм может быть применен для построения календарного плана с учетом временных ограничений, ограниченных складированных и нескладируемых ресурсов и снижения затрат на субподрядные ресурсы.

4. Разработан метод мультиагентной генетической оптимизации для решения рассматриваемой задачи планирования на основе интеграции генетических алгоритмов и имитационного моделирования по схеме Курейчика В. В., расширенной применением мультиагентного моделирования, алгоритмами имитации отжига и поиска новизны.

5. На основе метода мультиагентной генетической оптимизации разработаны информационные технологии планирования бизнес-процессов на основе продуктов семейства BPsim и системы АС ВМП. Интеллектуальный агент генетической оптимизации на основе продуктов семейства BPsim предоставляет пользователю возможность решения задачи календарного планирования с учетом минимизации стоимости субподрядных работ; поддерживает работу как непрограммирующего специалиста в своей области (менеджера проектов), так и бизнес-аналитика, владеющего навыками программирования. Информационная технология мультиагентного имитационно-эволюционного моделирования, реализованная в модуле оптимизации процессов предприятия системы АС ВМП, предоставляет пользователю, непрограммирующему специалисту в своей области, возможность планирования бизнес-процессов организационных систем путем проведения имитационно-эвристического поиска решений.

6. Разработана информационная технология планирования, интегрированная с программным комплексом BPsim. Применение технологии в проектной организации ЗАО «Телесистемы» позволило определить календарный план работ, обеспечивающий снижение затрат на оплату труда сторонних организаций; экономический эффект составил 390 000 рублей в год.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

| | |
|---------|---|
| АИС | Автоматизированная информационная система |
| АИС МОД | Автоматизированная система моделирования |
| АИО | Алгоритм имитации отжига |
| АС | Автоматизированная система |
| АСКУЭ | Автоматизированная система контроля и учета энерго- ресурсов |
| БЗ | База знаний |
| БП | Бизнес-процесс |
| ВМП | Выпуск металлургической продукции |
| ГА | Генетический алгоритм |
| ГО | Генетические операторы |
| ГОО | Группа обслуживания оборудования |
| ГОТС | Группа обслуживания телекоммуникационных систем |
| ГП | Горячая прокатка |
| ДФЭ | Дробнофакторный эксперимент |
| ЗКП | Задача календарного планирования |
| ИА | Интеллектуальный агент |
| ИАП | Интеллектуальный агент планирования |
| ИМ | Имитационная модель |
| ИТ | Информационная технология |
| КИС | Корпоративные информационные системы |
| ЛИ | Логистический инцидент |
| ЛПР | Лицо, принимающее решения |
| МАС | Мультиагентная система |
| МГО | Мультиагентная генетическая оптимизация |
| МКП | Метод критического пути |
| МППР | Мультиагентные процессы преобразования ресурсов |
| ОДАСП | Обмен данными с системами предприятия |
| ОИ | Оператор инверсии |
| ОК | Оператор кроссинговера |
| ОМ | Оператор мутации |
| ОМТО | Отдел материально-технического обеспечения |
| ОПП | Оптимизация процессов предприятия (модуль) |

| | |
|------|--|
| ОргИ | Организационный инцидент |
| ОС | Организационная система |
| ПВ | Потребности-возможности |
| ПД | Подготовка данных (модуль) |
| ПК | Программный комплекс |
| ПО | Проектный отдел |
| ПрО | Производственный отдел |
| ПФЭ | Полнофакторный эксперимент |
| РА | Реактивный агент |
| РДО | Ресурсы-Действия-Операции |
| САД | Система анализа данных |
| СДМС | Система динамического моделирования ситуаций |
| СИМ | Система имитационного моделирования |
| СМО | Система массового обслуживания |
| СМП | Создание модели процессов (модуль) |
| СПО | Стратегия поиска оригинальности |
| СППР | Система поддержки принятия решений |
| СПЭ | Стратегия поиска экстремума |
| ССП | Стратегия случайного поиска |
| ТЗ | Техническое задание |
| ТИ | Технологический инцидент |
| ТРП | Технорабочий проект |
| ФП | Функция пригодности |
| ХП | Холодная прокатка |
| ЭИ | Эвристико-имитационный (метод) |
| ЭМ | Эволюционное моделирование |

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Теория систем и системный анализ в управлении организациями: Справочник: Учеб. пособие / под ред. В. Н. Волковой, А. А. Емельянова. – М.: Финансы и статистика, 2006. – 848 с.
2. Черняк, Ю. И. Системный анализ в управлении экономикой / Ю. И. Черняк. – М.: Экономика, 1975. – 193 с.
3. Дитгер, Х. Планирование и контроль: концепция контроллинга. Пер. с немецкого / Х. Дитгер. – М.: Финансы и статистика, 1997. – 800 с.
4. Швецов, А. Н. Модели и методы построения корпоративных интеллектуальных систем поддержки принятия решений: дис. ... д-ра техн. наук: 05.13.01 / Швецов Анатолий Николаевич. – СПб., 2004. – 461 с.
5. Андрейчикова, О. Н. Системы компьютерной поддержки процессов анализа, синтеза и планирования решений в условиях неопределенности [Электронный ресурс] / О. Н. Андрейчикова // Программные продукты и системы. – 1999. – №3. – Режим доступа:
<http://www.swsys.ru/index.php?page=article&id=952&lang=>.
6. Исследование операций: В 2-х томах. Пер. с англ. / под ред. Дж. Модера, С. Элмаграби. – М.: Мир, 1981. – 677 с.
7. Танаев, В. С. Введение в теорию расписаний / В. С. Танаев, В. В. Шкурба. – М.: Наука, 1975. – 256 с.
8. Танаев, В. С. Теория расписаний. Одностадийные системы / В. С. Танаев, В. С. Гордон, Я. М. Шафранский. – М.: Наука, 1984. – 384 с.
9. Гимади, Э. Х. Задача календарного планирования крупномасштабного проекта в условиях ограниченных ресурсов: Опыт построения математического обеспечения / Э. Х. Гимади, Н. М. Пузынина // Управляемые системы. – 1983. – Вып. 23. – С. 24–32.
10. Гимади, Э. Х. Алгоритм решения задачи сетевого планирования в условиях ограниченных ресурсов / Э. Х. Гимади, Е. Н. Гончаров, В. В. Залюбовский // Перспективное планирование Западно-Сибирского нефтегазового комплекса. – 1987. – С. 172–180.
11. Гимади, Э. Х. О некоторых математических моделях и методах планирования крупномасштабных проектов / Э. Х. Гимади // Модели и методы оптимизации: Труды АН СССР. Сибирское Отделение. Институт математики. – Новосибирск: Наука, 1988. – Т. 10. – С. 89–115.

12. Гимади, Э. Х. О программно-математическом обеспечении для задачи ресурсно-календарного планирования восточно-сибирского нефтегазового комплекса / Э. Х. Гимади, Е. Н. Гончаров, В. В. Залюбовский, Н. И. Пляскина, В. Н. Харитонов // Вестник НГУ. Серия: Математика, механика, информатика. – 2010. – № 4. – С. 52–67.

13. Пляскина, Н. И. Сетевые модели координации принятия решений в межотраслевых мегапроектах освоения нефтегазовых регионов / Н. И. Пляскина, Э. Х. Гимади, Е. Н. Гончаров // Вестник НГУ. Серия: Социально-экономические науки. – 2012. – Т. 12, № 3. – С. 97–109.

14. Гимади, Э. Х. Полиномиальная разрешимость задач календарного планирования со складываемыми ресурсами и директивными сроками / Э. Х. Гимади, В. В. Залюбовский, В. В. Севастьянов // Дискретный анализ и исследование операций. – 2000. – Т. 7, № 1. – С. 9–34.

15. Гончаров, Е. Н. Точный алгоритм для задачи календарного планирования с ограниченными ресурсами / Е. Н. Гончаров, Д. В. Мишин // Прикладная математика и фундаментальная информатика. – 2017. – Т. 4, № 1. – С. 43–53.

16. Гончаров, Е. Н. Генетический алгоритм для задачи календарного планирования с ограниченными ресурсами / Е. Н. Гончаров, В. В. Леонов // Автоматика и телемеханика. – 2017. – № 6. – С. 173–189.

17. Захаров, Н. Ю. Разработка целевой функции оптимального планирования повышения квалификации сотрудников ВУЗа / Ю. Н. Захаров, А. Н. Полетайкин, В. С. Канев // Труды 12-й Международной Азиатской школы-семинара. – 2016. – С. 216–221.

18. Канев, В. С. Моделирование образовательных систем: некоторые итоги и актуальные перспективы / В. С. Канев, А. Н. Полетайкин // Экономика и управление: теория и практика. – 2018. – Т. 4, № 2. – С. 84–195.

19. Канев, В. С. Особенности оптимизации сложных социально-экономических систем / В. С. Канев // Материалы XIV Международной Азиатской школы-семинара «Проблемы оптимизации сложных систем». – 2018. – Ч. 1. – С. 276–283.

20. Мезенцев, Ю. А. Эффективный параметрический алгоритм оптимизации расписаний параллельных систем с заданным расписанием начала обслуживания / Ю. А. Мезенцев, И. В. Эстрайх // Научный вестник НГТУ. – 2018. – № 3 (72). – С. 87–106.

21. Мезенцев, Ю. А. Прикладные задачи и алгоритмы оптимизации расписаний параллельных обслуживающих систем / Ю. А. Мезенцев // Научный вестник НГТУ. – 2016. – № 1 (62). – С. 49–73.

22. Avdeenko, T. V. Efficient approaches to scheduling for unrelated parallel machines with release dates / T. V. Avdeenko, Y. A. Mesentsev // *Proceedings of the 10th International Forum on Strategic Technology*. – 2016. – V. 49, no. 12. – P. 1743–1748.

23. Севастьянов, С. В. Ресурсные ограничения в задачах календарного планирования и теории расписаний. Выработка общего подхода / С. В. Севастьянов // *Труды VI Международной конференции «Проблемы оптимизации и экономические приложения»*. – Омск: Омск. гос. ун-т, 2015. – С. 69–73.

24. Севастьянов, С. В. Построение расписаний выполнения независимых работ на идентичных параллельных машинах с прерываниями и миграционными задержками / С. В. Севастьянов // *Автоматика и телемеханика*. – 2010. – № 10. – С. 90–99.

25. Кочетов, Ю. А. Использование чередующихся окрестностей для приближенного решения задачи календарного планирования с ограниченными ресурсами / Ю. А. Кочетов, А. А. Столяр // *Дискретный анализ и исследование операций*. – 2003. – Т. 10, № 2. – С. 29–55.

26. Кочетов, Ю. А. Новые жадные эвристики для задачи календарного планирования с ограниченными ресурсами / Ю. А. Кочетов, А. А. Столяр // *Дискретный анализ и исследование операций*. – 2005. – Т. 12, № 1. – С. 12–36.

27. Столяр, А. А. Алгоритмы локального поиска для задачи календарного планирования с ограниченными ресурсами: автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук: 05.13.18 / Столяр Артем Александрович. – Новосибирск, 2005. – 17 с.

28. Норенков, И. П. Комбинированные и генетические алгоритмы составления расписаний в задачах проектирования / И. П. Норенков // *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана*. – 1995. – № 2. – С. 36–43.

29. Прилуцкий, М. Х. Многоиндексные задачи объёмно-календарного планирования транспортного типа / М. Х. Прилуцкий // *Труды 5 международной конференции «Идентификация систем и задачи управления SICPRO-06»*. – М.: Институт проблем управления РАН, 2006. – С. 503–510.

30. Johnson, S. M. Optimal two- and three-stage production schedules with setup times included / S. M. Johnson // *Naval Research Logistics Quarterly*. – 1954. – Vol. 1 (1). – P. 61–68.

31. Pritsker, A. GERT: graphical evaluation and review technique – Part I / A. Pritsker, W. Happ // *Fundamentals*. – 1966. – No. 5. – P. 267–274.

32. Pinedo, M. L. *Scheduling: theory, algorithms, and systems development* / M. L. Pinedo. – Springer, 2008.

33. Pinedo, M. L. Planning and scheduling in manufacturing and services / M. L. Pinedo. – Springer, 2005.
34. Clark, C. E. The PERT Model for Distribution of an Activity Time / C. E. Clark // Operations Research. – 1962. – No. 10. – P. 405–406.
35. В. Кай Разработка и применение метода реинжиниринга бизнес-процессов на основе мультиагентного моделирования: дис.... канд. техн. наук: 05.13.10 / Ван Кай. – Новосибирск, 2013. – 207 с.
36. Аксенов, К. А. Решение задачи планирования портфеля проектов и анализа узких мест бизнес-процессов на основе мультиагентного моделирования и метода критического пути [Электронный ресурс] / К. А. Аксенов, В. Кай, О. П. Аксенова // Современные проблемы науки и образования. – 2014. – № 2. – Режим доступа: www.science-education.ru/116-12630.
37. Афанасьев, М. Ю. Прикладные задачи исследования операций / М. Ю. Афанасьев, К. А. Багриновский, В. М. Матюшок. – М.: ИНФРА-М, 2006. – 352 с.
38. Wooldridge, M. The Gaia methodology for agent-oriented analysis and design / M. Wooldridge, N. Jennings, D. Kinny // Journal of Autonomous Agents and Multi-Agent Systems. – 2000. – P. 285–312.
39. Wooldridge, M. Intelligent agent: theory and practice / M. Wooldridge, N. Jennings // The knowledge engineering review. – 1995. – No. 10 (2). – P. 115–152.
40. Клейменова, Е. М. Оперативное распределение ресурсов при управлении проектами НИОКР на промышленном предприятии / Е. М. Клейменова // Материалы 6-й мультиконференции по проблемам управления МКПУ. – Ростов-на-Дону: Изд-во ЮФУ, 2013. – Т. 3. – С. 104–109.
41. Разработка принципов построения многоуровневой мультиагентной системы для управления проектами НИР и ОКР РКК «Энергия» / А. Л. Феоктистов [и др.] // Труды XIV Международной конференции «Проблемы управления и моделирования в сложных системах». – Самара: СНЦ РАН, 2012. – С. 718–723.
42. Скобелев, П. О. Открытые мультиагентные системы для оперативной обработки информации в процессах принятия решений: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.13.01 / Скобелев Петр Олегович. – Самара, 2003. – 35 с.
43. Скобелев, П. О. Открытые мультиагентные системы для поддержки процессов принятия решений при управлении предприятиями / П. О. Скобелев // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2001. – Т. 3. – С. 71–19.

-
44. Борщев, А. В. Практическое агентное моделирование и его место в арсенале аналитика / А. В. Борщев // *Exponenta Pro*. – 2004. – № 3–4 (7–8). – С. 38–47.
45. Карпов, Ю. Г. Имитационное моделирование систем. Введение в моделирование с AnyLogic 5 / Ю. Г. Карпов. – СПб.: БХВ-Петербург, 2005. – 400 с.
46. Рыбина, Г. В. Моделирование процессов взаимодействия интеллектуальных агентов в многоагентных системах / Г. В. Рыбина, С. С. Паронджанов // *Искусственный интеллект и принятие решений*. – 2008. – № 3. – С. 3–15.
47. Cetnarowicz, K. The application of evolution process in multi-agent world (MAW) to the prediction system / K. Cetnarowicz, M. Kisiel-Dorohinicki, E. Nawarecki // *Proceedings of the 2nd International Conference on Multi-Agent Systems*. – 1996. – P. 26–32.
48. Drezeński, R. A model of co-evolution in multi-agent system / R. Drezeński // *Multi-Agent Systems and Applications III*. – Berlin: Springer-Verlag, 2003. – Vol. 2691. – P. 314–323.
49. Аксенов, К. А. Принципы построения системы имитационного моделирования процессов преобразования ресурсов BPsim / К. А. Аксенов, Б. И. Клебанов // *Материалы первой Всероссийской научно-практической конференции «Опыт практического применения языков и программных систем имитационного моделирования в промышленности и прикладных разработках»*. – СПб.: ФГУП ЦНИИ технологии судостроения, 2003. – Т. 1. – С. 36–40.
50. Аксенов, К. А. Исследование и разработка средств имитационного моделирования дискретных процессов преобразования ресурсов: дис. ... канд. техн. наук: 05.13.18 / Аксенов Константин Александрович. – Екатеринбург, 2003. – 188 с.
51. Аксенов, К. А. Система имитационного моделирования процессов преобразования ресурсов / К. А. Аксенов, Б. И. Клебанов // *Научные труды IV отчетной конференции молодых ученых ГОУ ВПО УГТУ-УПИ*. – Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, 2003. – Ч. 1. – С. 135–136.
52. Aksyonov, K. A. Computer-aided design system of simulation business process model / K. A. Aksyonov, B. I. Klebanov, A. A. Hrenov // *Proceedings of the 4th IMACS Symposium on Mathematical Modeling*. – 2003. – P. 1414–1420.
53. Аксенов, К. А. Динамическое моделирование мультиагентных процессов преобразования ресурсов / К. А. Аксенов, Н. В. Гончарова. – Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, 2006. – 311 с.

54. Аксенов, К. А. Планирование портфеля проектов в строительстве на основе мультиагентного имитационного моделирования / К. А. Аксенов, О. П. Аксенова, Ван Кай /// Научно-технические ведомости СПбГПУ. Информатика. Телекоммуникации. Управление. – 2012. – № 6 (162). – С. 171–174.
55. Аксенов, К. А. Модель мультиагентного процесса преобразования ресурсов и системный анализ организационно-технических систем / К. А. Аксенов // Вестник компьютерных и информационных технологий. – 2009. – № 6. – С. 38–45.
56. Goldberg, D. Genetic Algorithms / D. Goldberg. – Addison Wesley, 1989.
57. Holland, H. J. Adaptation in Natural and Artificial Systems / H. J. Holland. – University of Michigan Press, 1975.
58. Емельянов, В. В. Теория и практика эволюционного моделирования / В. В. Емельянов, В. М. Курейчик, В. В. Курейчик. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003. – 432 с.
59. Курейчик, В. В. Теория эволюционных вычислений / В. В. Курейчик, В. М. Курейчик, С. И. Родзин. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2012. – 260 с.
60. Мышенков, К. С. Метод решения задачи календарного планирования ремонтов технологического оборудования предприятия с использованием генетического алгоритма [Электронный ресурс] / К. С. Мышенков, А. Ю. Романов // Наука и образование: электронное научно-техническое издание. – 2011. – № 9. – Режим доступа: <http://technomag.edu.ru/doc/212208.html>.
61. Зинченко, Л. А. Бионические информационные системы и их практические применения / Л. А. Зинченко, В. М. Курейчик, В. Г. Редько (ред.). – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2011. – 288 с.
62. Goffe, W. L. Global optimization of statistical functions with simulated annealing / W. L. Goffe, G. D. Ferrier, J. Rogers // Journal of Econometrics 60. – 1994. – P. 65–99.
63. Klimek, M. A genetic algorithm for the project scheduling with the resource constraints / M. A. Klimek // Annals UMCS Informatica. – 2010. – Vol. 10 (1). – P. 117–130.
64. Sriprasert, E. Genetic algorithms for multi-constrained scheduling: an application for the construction industry // E. Sriprasert, N. Dawood // Proceedings of the 20th International Conference Construction IT, Construction IT Bridging the Distance. – 2003. – P. 341–353.
65. Abdel-Khalek, H. Financing – scheduling optimization for construction projects by using genetic algorithms / H. Abdel-Khalek, M. H. Sherif, A. M. el-Lacany, Y. Abdel-Magd // Proceedings of World Academy of Science, Engineering and Technology. – 2011. – P. 289–297.

-
66. Karova, M. A genetic algorithm for project planning problem / M. Karova, J. Petkova, V. Smarkov // *Proceedings of International Scientific Conference Computer Science*. – 2008. – P. 647–651.
67. Osaba, E. Simulation tool based on a memetic algorithm to solve a real instance of a dynamic TSP / E. Osaba, R. Carballedo, F. Diaz // *Proceedings of IASTED International Conference Applied Simulation and Modelling*. – 2012. – P. 27–33.
68. Dhingra, A. A bi-criteria M-machine SDST flow shop scheduling using modified heuristic genetic algorithm / A. Dhingra, P. Chandna // *International Journal of Engineering, Science and Technology*. – 2010. – Vol. 2, no. 5. – P. 216–225.
69. Yang, F.-C. A genetic algorithm based method for creating impartial work schedules for nurses / F.-C. Yang, W.-T. Wu // *International Journal of Electronic Business Management*. – 2012. – Vol. 10, no. 3. – P. 182–193.
70. Применение мультиагентной системы принятия решений в управлении строительным холдингом / К. А. Аксенов [и др.] // *Вестник УрФУ. Серия экономика и управление*. – 2012. – № 5. – С. 106–117.
71. Brezuliani, A. A genetic algorithm approach for scheduling of resources in well-services companies / A. Brezuliani, L. Fira, M. Fira // *International Journal of Advanced Research in Artificial Intelligence*. – 2012. – Vol. 1, no. 5. – P. 1–6.
72. Okada, I. A random key-based genetic algorithm approach for resource-constrained project scheduling problem with multiple modes / I. Okada, X. F. Zhang, H. Y. Yang, S. Fujimura // *Proceedings of the International MultiConference Engineers and Computer Scientists*. – 2010.
73. He, J. Construction project scheduling problem with uncertain resource constraints / J. He, Zh.-P. Wan // *Journal of Construction Engineering and Management ASCE*. – 2002. – Vol. 15, no. 1. – P. 324–326.
74. Zhang, X. A new uncertain programming model for project scheduling problem / X. Zhang, X. Chen // *An International Interdisciplinary Journal*. – 2012. – Vol. 15, no. 10. – P. 1–10.
75. Csebfalvi, A. A unified model for resource constrained project scheduling problem with uncertain activity durations / A. Csebfalvi // *International Journal of Optimization in Civil Engineering*. – 2012. – Vol. 2, no. 3. – P. 341–355.
76. Artigues, C. Robust optimization for resource-constrained project scheduling with uncertain activity durations / C. Artigues, R. Leu, F. Nobibon // *Flexible Services and Manufacturing Journal*. – 2013. – Vol. 25, no. 1&2. – P. 175–205.
77. Chen, M.-Y. Evaluating subcontractor performance using evolutionary fuzzy hybrid neural network / M.-Y. Chen, H.-C. Tsai, E. Sudjono // *International Journal of Project Management*. – 2001. – P. 349–356.

78. Авдеенко, Т. В. О возможностях применения методов и моделей теории расписаний для оптимизации работы веб-студии / Т. В. Авдеенко, Р. В. Петров // Сборник научных трудов НГТУ. – 2016. – № 2 (84). – С. 7–20.

79. Методология построения эффективного решения многоэтапных задач календарного планирования на основе принципа иерархии и комплекса взаимосвязанных моделей и методов [Электронный ресурс] / М. З. Згуровский [и др.] // Вісник НТУУ «КПІ». Інформатика, управління та обчислювальна техніка. – 2010. – № 50. – Режим доступа: http://it-visnyk.kpi.ua/wp-content/uploads/2011/03/50_02.pdf.

80. Rules for construction of simulation models for production processes optimization / К. А. Aksyonov [et al.] // Proceedings of the 3rd International Workshop on Radio Electronics and Information Technologies. – 2018. – Vol. 2076. – P. 9–18.

81. О применении критериев проверки однородности средних / Б. Ю. Лемешко [и др.] // Вестник СибГУТИ. – 2018. – № 1. – С. 41–55.

82. Экономико-математические методы и прикладные модели / под ред. В. В. Федосеева. – М.: Юнити, 1999. – 392 с.

83. Советов, Б. Я. Моделирование систем: учеб. для вузов. 3-е изд. / Б. Я. Советов, С. А. Яковлев. – М.: Высш. шк., 2001. – 343 с.

84. Андрейчиков, А. В. Интеллектуальные информационные системы / А. В. Андрейчиков, О. Н. Андрейчикова. – М.: Финансы и статистика, 2006. – 424 с.

85. Авдеенко, Т. В. Мультиагентный подход с использованием нечеткого моделирования в задаче многокритериального принятия решений / Т. В. Авдеенко, М. А. Васильев // Научный вестник НГТУ. – 2010. – № 1 (38). – С. 63–74.

86. Клейменова, Е. М. Система оперативного распределения ресурсов при управлении проектами создания и эксплуатации образцов новой техники и ее применение на предприятиях аэрокосмической отрасли: автореф. дис. канд. техн. наук: 05.13.01 / Клейменова Елена Михайловна. – Самара, 2013. – 20 с.

87. Емельянов, В. В. Введение в интеллектуальное имитационное моделирование сложных дискретных систем и процессов. Язык РДО / В. В. Емельянов, С. И. Ясиновский. – М.: «АНВИК», 1998. – 427 с.

88. RDO-studio: инструментарий для интеллектуального имитационного моделирования / В. В. Емельянов [и др.] // Программные продукты и системы. – 2006. – № 2. – С. 2–5.

89. Клейнрок, Л. Теория массового обслуживания / Л. Клейнрок. – М.: Машиностроение, 1979. – 432 с.

-
90. Томашевский, В. Имитационное моделирование в среде GPSS / В. Томашевский, Е. Жданова. – М.: Бестселлер, 2003. – 416 с.
91. Официальный сайт языка UML [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.uml.org>.
92. Мацяшек, Л. А. Анализ требований и проектирование систем. Разработка информационных систем с использованием UML: пер. с англ. / Л. А. Мацяшек. – М.: Издательский дом «Вильямс», 2002. – 432 с.
93. Ковалев, М. Я. Модели и методы календарного планирования. Курс лекций / М. Я. Ковалев. – Минск: БГУ, 2004. – 62 с.
94. Аверченков, В. И. Эволюционное моделирование и его применение: монография. 2-е изд. / В. И. Аверченков, П. В. Козаков. – М.: Флинта, 2011. – 200 с.
95. Шаповалов, Т. С. Планирование выполнения заданий в распределенных вычислительных системах с применением генетических алгоритмов: автореф. дис.... канд. техн. наук: 05.13.11 / Шаповалов Тарас Сергеевич. – Иркутск, 2011. – 18 с.
96. Мышенков, К. С. Постановка задачи составления календарного плана ремонтов оборудования предприятия / К. С. Мышенков, А. Ю. Романов // Сборник научных трудов XIV Международной научно-практической конференции «Системный анализ в проектировании и управлении». – 2010. – Т. 1. – С. 240–243.
97. Омельченко, А. А. Генетический алгоритм составления оптимального плана реализации компьютерной техники / А. А. Омельченко, А. Н. Полетайкин // Вопросы прикладной математики и математического моделирования. – 2010. – С. 221 – 231.
98. Анализ систем имитационного моделирования на примере задачи разработки модели технологической логистики [Электронный ресурс] / А. С. Антонова [и др.] // Современные проблемы науки и образования. – 2013. – № 6. – Режим доступа: <http://www.science-education.ru/113-11342>.
99. СИМ Plant Simulation [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.plm.automation.siemens.com/global/en/products/manufacturing-planning/plant-simulation-throughput-optimization.html>.
100. Медведев, В. И. Имитационное моделирование систем и процессов в системе Tecnomatix Plant Simulation / В. И. Медведев // Материалы четвертой Всероссийской научно-практической конференции «Имитационное моделирование. Теория и практика». – С.Пб.: Центр технологии судостроения и судоремонта, 2009. – Т. 1. – С. 288–291.
101. СИМ Simio [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.simio.com/software/simulation-software.php>.

102. Smith, J. S. Simio and Simulation: Modeling, Analysis, Applications. 5-th ed. / J. S. Smith, D. T. Sturrock, W. D. Kelton. – Simio LLC, 2018.

103. Development of decision support system «BPsim3»: Multi-service telecommunication networks design and modeling application / К. А. Аксенов [et al.] // Proceedings of 10th International PhD Workshop on Systems and Control. – 2009. – P. 112–117.

104. Computer Aided Enterprise Information Systems Engineering with BPsim Studio / К. А. Аксенов [et al.] // Proceedings of the IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics. – 2008. – P. 3497–3501.

105. Аксенов, К. А. Теория и практика средств поддержки принятия решений: монография / К. А. Аксенов. – Germany: LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH & Co. KG, 2011. – 341 с.

106. Аксенов, К. А. Моделирование процесса выпуска металлургической продукции в системах AnyLogic и BPsim.MAS / К. А. Аксенов, А. С. Антонова, М. В. Киселева // Материалы шестой Всероссийской научно-практической конференции «Имитационное моделирование. Теория и практика». – Казань: Академия наук РТ, 2013. – Т. 2. – С. 13–18.

107. Intelligent decision support based on multi-agent simulation of resource conversion processes / К. А. Аксенов [et al.] // Proceedings of the 11th International PhD Workshop on Systems and Control. – 2010. – P. 45–50.

108. Аксенов, К. А. Разработка инструмента поддержки реинжиниринга мультиагентного процесса преобразования ресурсов для системы имитационного моделирования BPsim.MAS / К. А. Аксенов [и др.] // Научные труды XVII Международной конференции молодых ученых по приоритетным направлениям развития науки и техники. – Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2010. – Ч. 2. – С. 49–52.

109. Коналлен, Дж. Разработка Web-приложений с использованием UML / Дж. Коналлен. – М.: Издательский дом «Вильямс», 2001. – 288 с.

110. Сидняев, Н. И. Теория планирования эксперимента и анализ статистических данных: учебник и практикум для вузов. – 2-е изд., перераб. и доп. / Н. И. Сидняев. – М.: Издательство Юрайт, 2019. – 495 с.

111. Aksyonov, K. Multiagent genetic optimisation to solve the project scheduling problem / K. Aksyonov, A. Antonova // Proceedings of The Eighth International Multi-Conference on Computing in the Global Information Technology. – 2013. – pp. 237–242.

112. Аксенов, К. А. Анализ моделей динамического моделирования ситуаций применительно к исследованию организационно-технических систем / К. А. Аксенов, А. С. Антонова // Материалы международной

научной конференции «Информационные Технологии и Системы 2012». – Челябинск: Изд-во ЧелГУ, 2012. – С. 85–87.

113. Аксенов, К. А. Анализ и синтез процессов преобразования ресурсов на основе имитационного моделирования и интеллектуальных агентов / К. А. Аксенов, А. С. Антонова, И. В. Спицина // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Информатика. Телекоммуникации. Управление. – 2011. – № 1 (115). – С. 13–19.

114. Технология системного моделирования / Е.Ф. Аврамчук и др.; под общ. ред. С.В. Емельянова. – М.: Машиностроение, 1988. – 520 с.

115. Прицкер, А. Введение в имитационное моделирование и язык СЛАМ II: пер. с англ. / А. Прицкер. – М.: Мир, 1987. – 646 с.

116. Аксенов, К. А. Применение имитационного моделирования и технологии интеллектуальных агентов для решения задачи управления проектами / К. А. Аксенов, А. С. Антонова // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Информатика. Телекоммуникации. Управление. – 2011. – № 4 (128). – С. 27–36.

117. Aksyonov, K. A. Application of simulation and intelligent agents to solve project management problem / K. A. Aksyonov, A. S. Antonova // International Journal of Computer Science Engineering and Information Technology Research. – 2013. – Vol. 3-1. – P. 321–330.

118. Антонова, А. С. Применение мультиагентного и эволюционного моделирования при планировании работ / А. С. Антонова, К. А. Аксенов // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Информатика. Телекоммуникации. Управление. – 2003. – № 6 (186). – С. 126–136.

119. Антонова, А. С. Генетическая оптимизация при решении задачи планирования проектных работ [Электронный ресурс] / А. С. Антонова, К. А. Аксенов // Современные проблемы науки и образования. – 2012. – № 6. – Режим доступа: <http://www.science-education.ru/106-7409>.

120. Aksyonov, K. A. Multi agent genetic decision support for projects scheduling / K. A. Aksyonov, A. S. Antonova // Proceedings of the 23rd International Crimean Conference «Microwave & Telecommunication Technology». – 2013. – Vol. 1. – P. 426–427.

121. Aksyonov, K. Multiagent genetic optimisation to solve the project scheduling problem under uncertainty / K. A. Aksyonov, A. S. Antonova // International Journal on Advances in Software. – 2014. – Vol. 7, no. 1&2. – P. 1–19.

122. Антонова, А. С. Применение мультиагентного и эволюционного моделирования в проектном управлении / А. С. Антонова, К. А. Аксенов // Компьютерное моделирование 2013: труды международной научно-технической конференции. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2013. – С. 216–221.

123. Антонова, А. С. Сравнительный анализ методов планирования субподрядных работ [Электронный ресурс] / А. С. Антонова, К. А. Аксенов // Современные проблемы науки и образования. – 2014. – № 3. – Режим доступа: www.science-education.ru/117-13388.

124. Aksyonov, K. A. Analysis of Subcontracting Scheduling Methods Based on Modeling / K. A. Aksyonov, A. S. Antonova // Proceedings of the 11th European Modelling Symposium on Mathematical Modelling and Computer Simulation. – 2017. – P. 138–141.

125. Aksyonov, K. A. Choice of the scheduling technique taking into account the subcontracting optimization / K. A. Aksyonov, A. S. Antonova, N. V. Goncharova // Proceedings of the 3rd International Symposium on Signal Processing and Intelligent Recognition Systems. – Springer Verlag, 2017. – Vol. 678. – P. 297–304.

126. Aksyonov, K. A. Comparative analysis of subcontracting scheduling methods / K. A. Aksyonov, A. S. Antonova, E. G. Sysoletin // Proceedings of the ICCAN. – Springer Verlag, 2017. – Vol. 710. – P. 439–448.

127. Разработка автоматизированной системы анализа, моделирования и принятия решений для металлургического предприятия на основе мультиагентного подхода / К. А. Аксенов [и др.] // Автоматизация в промышленности. – Москва, 2014. – № 7. – С. 49–53

128. Блинов, Д. В. Перспективы развития автоматизированных систем управления на металлургических предприятиях уральского региона [Электронный ресурс] / Д. В. Блинов, К. А. Аксенов, А. С. Антонова // Современные проблемы науки и образования. – 2014. – № 5. – Режим доступа: www.science-education.ru/119-15186.

129. Модуль создания моделей процессов: свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ / К. А. Аксенов, Е. Г. Сысолетин, Е. Ф. Смолий, С. Д. Ростунцев, А. С. Антонова, С. Б. Белан, М. Д. Дубовик. – № 2015619618; дата регистрации 08.09.2015 г.

130. Модуль подготовки данных: свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ / А. М. Бородин, С. Г. Мирвода, С. В. Поршневу, С. Т. Князев, С. Б. Белан, М. Д. Дубовик, А. С. Антонова, А. А. Шеклеин. – № 20153656; дата регистрации 28.12.2015 г.

131. Модуль оптимизации процессов предприятия: свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ / Д. А. Беренов, К. А. Аксенов, Е. Г. Сысолетин, Е. Ф. Смолий, С. Д. Ростунцев, А. С. Антонова, А. В. Чирышев, С. Б. Белан, М. Д. Дубовик. – № 2015619510; дата регистрации 04.09.2015 г.

132. Модуль планирования имитационного эксперимента модели процесса преобразования ресурсов «Планировщик»: свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ / К. А. Аксенов, А. С. Антонова, О. П. Аксенова, В. Кай, А. Л. Неволлина. – № 2013615160; дата регистрации 29.05.2013 г.

133. Быков, Е. А. Аналитический обзор средств и методов для планирования имитационного эксперимента и синтеза мультиагентных процессов преобразования ресурсов [Электронный ресурс] / Е. А. Быков, К. А. Аксенов, А. С. Антонова // Современные проблемы науки и образования. – 2014. – № 2. – Режим доступа: <http://www.science-education.ru/116-12599>.

134. Реализация эволюционно-имитационного алгоритма оптимизации процессов в системе моделирования производственных процессов металлургического предприятия [Электронный ресурс] / А. С. Антонова [и др.] // Современные проблемы науки и образования. – 2015. – № 2. – Режим доступа: <http://www.science-education.ru/122-21220>.

135. Aksyonov, K. A. Evolutionary-simulation algorithm implementation for logistic processes optimization / K. A. Aksyonov, A. S. Antonova, I. V. Ver-shinina // Proceedings of the Siberian Symposium on Data Science and Engineering. – 2017. – P. 18–22.

136. Tools and methodologies for business processes formalization: application to multi-agent systems / K. A. Aksyonov [et al.] // Proceedings of the 5th European Symposium on Computer Modeling and Simulation. – 2011. – P. 113–118.

137. Антонова, А. С. Применение эволюционно-имитационного алгоритма для решения задачи параметрического синтеза процесса преобразования ресурсов / А. С. Антонова, К. А. Аксенов // 28 международная конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии». – 2018. – С. 443–447.

138. Aksyonov, K. A. Analysis of the electric arc furnace workshop logistic processes using multiagent simulation / K. A. Aksyonov, A. S. Antonova, N. V. Goncharova // Advances in Signal Processing and Intelligent Recognition Systems. – 2017. – Vol. 678. – P. 390–397.

139. Aksyonov, K. A. Development of a hybrid decision-making method based on a simulation-genetic algorithm in a web-oriented metallurgical enterprise information system / K. A. Aksyonov, A. S. Antonova // Proceedings of the 10th International Conference on Ubiquitous and Future Networks. – 2018. – P. 197–202.

140. Антонова, А. С. Разработка имитационной модели раскрытия слэбов на машине непрерывного литья заготовок [Электронный ресурс] / А. С. Антонова, К. А. Аксенов // Современные проблемы науки и образования. – 2015. – № 1. – Режим доступа: <http://www.science-education.ru/121-18535>.

141. Application of a models integration module to the cutting slabs problem in a continuous casting machine / K. A. Aksyonov [et al.] // Proceedings of The Tenth International Multi-Conference on Computing in the Global Information Technology. – 2015. – P. 65–72.

142. Аксенов, К. А. Анализ работы электросталеплавильного цеха с помощью имитационного моделирования [Электронный ресурс] / К. А. Аксенов, А. С. Антонова, А. М. Айзатуллов // Современные проблемы науки и образования. – 2015. – № 2. – Режим доступа: <http://www.science-education.ru/122-21153>.

143. Исследование работы обрабатывающего цеха с помощью мульти-агентной модели процессов преобразования ресурсов [Электронный ресурс] / А. С. Кондратьев [и др.] // Современные проблемы науки и образования. – 2015. – № 1. – Режим доступа: <http://www.science-education.ru/121-18536>.

144. Моделирование процессов управления кранами на конвертерном производстве [Электронный ресурс] / Н. А. Бегунов [и др.] // Современные проблемы науки и образования. – 2015. – № 1. – Режим доступа: <http://www.science-education.ru/121-18539>.

145. Aizatulloev, A. M. Analysis and simulation of the cranes control processes for converter production / A. M. Aizatulloev, O. P. Aksyonova, A. S. Antonova // Proceedings of the 25th International Crimean Conference «Microwave & Telecommunication Technology». – 2015. – Vol. 1. – P. 295–296.

146. Rudi, S. I. The simulation model of BOF production logistics / S. I. Rudi, A. S. Antonova, A. I. Rudi // Proceedings of the 25th International Crimean Conference «Microwave & Telecommunication Technology». – 2015. – Vol. 1. – P. 319–320.

147. Aksyonov, K. A. The use of simulation in the management of converter production logistics processes / K. A. Aksyonov, A. S. Antonova // Intelligent Systems Technologies and Applications. – Springer Verlag, 2016. – Vol. 530. – P. 675–682.

148. Аксенов, К. А. Применение автоматизированной системы выпуска металлургической продукции для анализа логистических процессов / К. А. Аксенов, А. С. Антонова // Пленарные доклады Девятой всероссийской научно-практической конференции «Имитационное моделирование. Теория и практика». – Екатеринбург: Урал. гос. пед. ун-т, 2019. – С. 96–116.

149. Aksyonov, K.A., Application of a metallurgical enterprise information system for collection and analysis of big data and optimization of multi-agent resource conversion processes / K.A. Aksyonov, A.S. Antonova // Proceedings of the International Research Workshop on Information Technologies and Mathematical Modeling for Efficient Development of Arctic Zone. – 2018. – P. 1–6.

150. Antonova, A.S. Analysis of cranes control processes for converter production based on simulation / A.S. Antonova, O.P. Aksyonova, W. Kai, K.A. Aksyonov // CEUR Workshop Proceedings, 2017. – Vol. 1814. – P. 21–27.

151. Aksyonov, K.A. Application of the process parameter analysis tree for technological process analysis / K.A. Aksyonov, A.S. Antonova // Proceedings of the 2018 Ural Symposium on Biomedical Engineering, Radioelectronics and Information Technology, USBEREIT. – 2018. – P. 212–215.

152. Аксенов, К.А. Применение дерева анализа параметров процесса для контроля стабильности процесса разлива плавки на машине непрерывного литья заготовок / К.А. Аксенов, А.С. Антонова, М.Д. Дубовик, С.А. Перескоков // Современные наукоемкие технологии. – 2019. – № 7. – С. 9–14.

153. Antonova, A.S. Frame-based expert system implementation for resource conversion processes analysis / A.S. Antonova, K.A. Aksyonov // CEUR Workshop Proceedings, 2018. – Vol. 2274. – P. 23–32.

154. Antonova, A.S. Method of planning experiments for simulation-evolutionary modeling and improvement of the multiagent resource conversion processes / A.S. Antonova, K.A. Aksyonov // Proceedings of the 2019 Ural Symposium on Biomedical Engineering, Radioelectronics and Information Technology, USBEREIT. – 2019. – P. 217–220.

155. Aksyonov, K.A. Implementation of algorithm of multicriteria analysis under uncertainty based on integration of expert systems, fuzzy sets theory, and numerical methods / K.A. Aksyonov, A.S. Antonova // AIP Conference Proceedings, 2019. – Vol. 2116. – P. 390004.

156. Antonova, A.S. Analysis of integration methods of simulation, evolutionary, and expert modeling to optimize of resource conversion processes / A.S. Antonova, K.A. Aksyonov, P.E. Ziolkovskaia // Proceedings of the SIBIRCON 2019 - International Multi-Conference on Engineering, Computer and Information Sciences. – 2019. – P. 0416–0421.

157. Development of cloud-based microservices to decision support system / K.A. Aksyonov [et al.] // IFIP Advances in Information and Communication Technology, 2020. – Vol. 582. – P. 87–97.

158. Using of open-source technologies for the design and development of a Speech processing system based on stemming methods / A.A. Tarasiev [et al.] // IFIP Advances in Information and Communication Technology, 2020. – Vol. 582. – P. 98–105.

Научное издание

Антонова Анна Сергеевна
Аксенов Константин Александрович

**РАЗРАБОТКА МЕТОДА ПЛАНИРОВАНИЯ
БИЗНЕС-ПРОЦЕССОВ НА ОСНОВЕ
ИМИТАЦИОННО-ЭВОЛЮЦИОННОГО
МОДЕЛИРОВАНИЯ**

Монография



Технический редактор Доронкина Е.Н.

Подписано в печать 23.09.2020.

Бумага офсетная.

Гарнитура Times New Roman.

Формат 60×84 1/16.

Печать трафаретная. Печ. л. 18,09.

Тираж 500 экз. Заказ № 021-20.

Отпечатано в типографии ИД «Академия Естествознания»,
440026, г. Пенза, ул. Лермонтова, 3